

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

**DESENVOLUPAMENT D'UNA APLICACIÓ AMB MATLAB PER
L'AVALUACIÓ D'ALGORISMES GMPPT (GLOBAL MAXIMUM
POWER POINT TRACKING)**



Memòria i Annexos

Autor: Jordi Torné Chertó
Director: Guillermo Velasco Quesada
Convocatòria: Setembre 2019

Resum

En aquest projecte es presenta una comparació entre els algorismes $0.8 V_{oc}$ i el “*Differential Evolution*” per donar resposta a la cerca del punt global de màxima potència en panells fotovoltaics. La comparació s’ha dut a terme mitjançant l’anàlisi de la resposta en règims que presenten ombres parcials. Aquests règims han estat simulats en emuladors fotovoltaics programats mitjançant Matlab i el Toolbox que incorpora per connectar-se amb els instruments. De la mateixa forma, la lògica dels algorismes utilitzats s’ha programat amb Matlab.

Els règims estudiats, l’estàtic i el dinàmic, són el resultat de la corba I-V que generen un conjunt de 3 panells connectats en sèrie. Aquesta corba s’aconsegueix a partir del model matemàtic dels panells.

Els algorismes empleats s’han determinat per l’alta velocitat de convergència que presenten i per fer el correcte seguiment del punt global de màxima potència quan la instal·lació es veu afectada per ombres parcials. Aquesta última característica és la principal diferència entre els algorismes estudiats i els que són més utilitzats en l’actualitat com el de Pertorbació i Observació o la Conductància Incremental.

Darrera modificació d’aquest document: 24 de Setembre del 2019

Resumen

En este proyecto se presenta una comparación entre los algoritmos $0.8 V_{OC}$ y el “*Differential Evolution*” para dar respuesta a la búsqueda del punto global de máxima potencia en paneles fotovoltaicos. La comparación se ha dado mediante el análisis de la respuesta en regímenes que presentan sombras parciales. Estos regímenes han sido simulados en emuladores fotovoltaicos programados mediante Matlab y el Toolbox que incorpora para conectarse con los instrumentos. De la misma forma, la lógica de los algoritmos utilizados se ha programado con Matlab.

Los regímenes estudiados, el estático y dinámico, son el resultado de la curva I-V que generan un conjunto de tres paneles conectados en serie. Esta curva se consigue a partir del modelo matemático de los paneles.

Los algoritmos empleados se han determinado por la alta velocidad de convergencia que presentan y por hacer un correcto seguimiento del punto global de máxima potencia cuando la instalación se ve afectada por sombras parciales. Esta última característica es la principal diferencia entre los algoritmos estudiados y los más utilizados a día de hoy como son el de Perturbación i Observación o la Conductancia Incremental.

Abstract

This project presents the comparison between $0.8 V_{OC}$ and the Differential Evolution algorithms to respond to the search for the global maximum power point in photovoltaic panels. The comparison has made by analyzing the response in regimes that present partial shading. These regimes have been simulated on photovoltaic emulators programed using Matlab and the Toolbox that it incorporates to connect with the instruments. In the same way, the logic of the algorithms used has been programed with Matlab.

The regimes studied, the static and the dynamic, are the result of the I-V curve generated by a string of three panels. This characteristic curve is obtained from the photovoltaic panel's mathematical model.

The algorithms used have been determined by the high convergence speed they present and by correctly monitoring the global maximum power point when the installation is affected by partial shading. This last characteristic is the main difference between the algorithms studied and the most used today as are the P&O or the Incremental Conductance.

Glossari

MPP	Maximum Power Point.
MPPT	Maximum Power Point Tracker.
GMPP	Global Maximum Power Point.
GMPPT	Global Maximum Power Point Tracker.
STC	Standard Test Condition (1000W/m^2 ; 25°C ; AM:1,5).
A	Factor d'idealitat del díode.
E_g	Energia de la banda prohibida o "bandgap" (eV).
G	Irradiància (W/m^2).
I	Intensitat (A).
I_D	Intensitat que circula pel díode (A).
I_{mpp}	Intensitat al punt de màxima potència (A).
I_O	Intensitat de saturació del díode (A).
I_{OUT}	Intensitat proporcionada pel panell fotovoltaic (A).
I_{PV}	Intensitat fotoelèctrica (A).
I_{SC}	Intensitat de curtcircuit (A).
I_{SH}	Intensitat que circula per la resistència en paral·lel (A).
k	Constant de Boltzmann ($k=1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).
K_i	Coefficient de temperatura del curtcircuit ($\text{A}/^\circ\text{C}$).
P	Potència (W).
P_{mpp}	Potència al MPP.
q	Càrrega elèctrica ($q=1,60217662 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

R_s	Resistència en sèrie (Ω).
R_{SH}	Resistència en paral·lel (Ω).
V	Voltatge (V).
V_{mpp}	Voltatge al punt de màxima potència (V).
V_{OC}	Voltatge en circuit obert (V).
V_T	Voltatge tèrmic (V).



Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
GLOSSARI	IV
1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Objectius del treball	1
1.2. Abast del treball	1
2. MARC TEÒRIC	2
2.1. Panell fotovoltaic	2
2.1.1. Efecte Fotovoltaic	2
2.1.2. Model Matemàtic del panell fotovoltaic	3
2.1.3. Mètodes per determinar els paràmetres desconeguts	4
2.1.4. Efecte de la irradiància i la temperatura en la corba I-V i P-V	5
2.1.5. Mètode numèric de resolució del model	6
2.2. Corbes del panell fotovoltaic	7
2.2.1. Representació de les corbes fotovoltaiques	7
2.2.2. Corbes respecte la variació de la temperatura i la irradiància	8
2.3. Algorismes de seguiment del punt de màxima potencia	10
2.3.1. Algorismes MPPT	10
2.3.2. Efecte de l'ombra parcial	12
2.3.3. Algorismes GMPPT	13
3. EQUIPS NECESSARIS PER REALITZAR LA SIMULACIÓ.	15
3.1. Hardware	15
3.2. Connexions entre els instruments	16
3.3. Software utilitzat	16
4. SIMULACIÓ INICIAL	18
4.1. Escenari estàtic	18
4.2. Règim dinàmic	24
5. SIMULACIÓ DELS ALGORISMES	27
5.1. Algorisme 0.8 V_{oc}	28

5.1.1.	Resposta davant dels escenaris estacionaris.....	29
5.1.2.	Resposta davant dels escenaris dinàmics.....	31
5.2.	Algoritme Differential Evolution (DE).....	33
5.2.1.	Resposta davant dels escenaris estacionaris.....	36
5.2.2.	Resposta davant dels escenaris dinàmics.....	37
5.3.	Comparació entre els algoritmes	39
6.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	41
	CONCLUSIONS.....	43
	PRESSUPOST I ANÀLISI ECONÒMICA	44
	BIBLIOGRAFIA	46
	ANNEX A. CODIS EMPRATS EN L'APLICACIÓ DE MATLAB	47
A1.	Funció del model matemàtic del panell fotovoltaic	47
A2.	Algoritme $0.8 V_{oc}$	49
A3.	Algoritme DE.....	54

1. Introducció

Els darrers anys l'energia provinent dels panells fotovoltaics ha agafat importància a causa de ser una font renovable, sostenible i una possible alternativa a aquelles que contaminen durant la seva generació. Tot i això presenta certs inconvenients que dificulten la seva implantació, essent un dels més importants la seva baixa eficiència. Aquesta és deguda principalment per les limitacions dels materials i per no situar el panell en el punt de màxima potència.

Recentment, s'han dissenyat controladors que permeten situar un sistema de panells fotovoltaics al punt de màxima potència, millorant la seva producció. Ara bé, aquests no solen trobar el nombrat punt quan apareixen ombres parcials al camp fotovoltaic amb la qual cosa es deixa d'aprofitar una quantitat considerable d'energia. Aquesta problemàtica es pot solucionar mitjançant l'ús d'algoritmes GMPPT.

1.1. Objectius del treball

L'objectiu principal del projecte és comparar les respostes de dos algoritmes GMPPT davant d'escenaris que presenten ombres parcials. S'utilitzaran emuladors per realitzar els experiments en les mateixes condicions i Matlab per gestionar la connexió amb els instruments i programar la seva lògica. S'ha elegit Matlab perquè es disposa d'una llicència gratuïta i conté una Toolbox que facilita les connexions.

Com a objectiu secundari s'ha pretès realitzar un codi nítid i clar per tal de poder ser reutilitzat en futurs projectes.

1.2. Abast del treball

L'abast del projecte es pot dividir en quatre parts: els escenaris de les simulacions, la connectivitat entre instruments, la programació dels algoritmes i l'anàlisi dels resultats. Val a dir que en l'apartat dels escenaris de les simulacions s'inclou el model matemàtic del panell fotovoltaic, el qual facilita la creació de les seves corbes característiques.

No entrarà dintre de l'abast la implementació real dels algoritmes en panells fotovoltaics, sent únicament provat en emuladors. D'altra banda, tampoc es farà una comparació entre els algoritmes MPPT i GMPPT davant escenaris en presència d'ombra parcial.

2. Marc Teòric

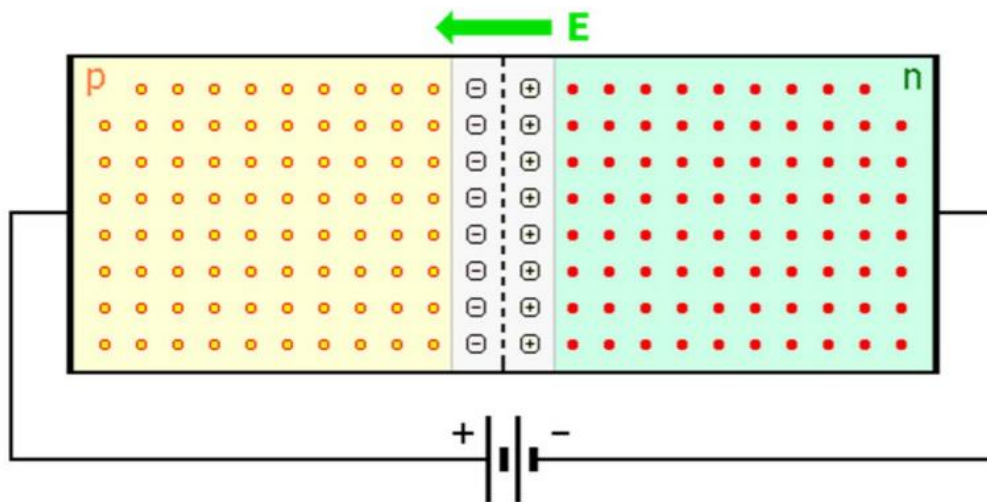
2.1. Panell fotovoltaic.

2.1.1. Efecte Fotovoltaic.

Com és ben sabut, el panell fotovoltaic està format per cèl·lules fotovoltaiques. Aquestes, bàsicament són la unió p-n del semiconductor (usualment de silici), les quals tenen una capa dopada positivament donant lloc a forats (regió p) i una altra dopada negativament donant lloc a electrons lliures (regió n).

Al unir les regions p i n, els portadors de càrrega majoritaris es difonen degut al gradient de concentració existent, fent que els forats més exteriors es desplacin cap al costat n i els electrons lliures cap al costat p. El desplaçament genera un camp elèctric que va creixent fins que s'oposa a la mateixa difusió, això provoca que el flux de corrent sigui unidireccional (de la regió p a la n). ^[1]

Pel que fa a la producció d'electricitat mitjançant l'energia solar, quan els fotons tenen major energia que la capa de valència dels semiconductor arranquen els electrons creant una parella d'electrons lliures i forats que circulen a través del material. Això dona lloc a la producció d'electricitat que serà proporcional a la irradiància rebuda.



Il·lustració 2.1. Materials Semiconductors. Unió P-N^[1]

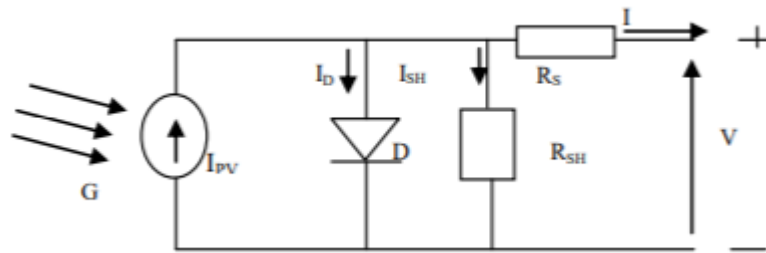
2.1.2. Model Matemàtic del panell fotovoltaic

Els panells fotovoltaics presenten una relació no lineal entre la característica Intensitat-Tensió i Potència-Tensió, la qual es veu afectada tant per la irradiància incident com la per la mateixa temperatura.

Actualment hi ha models que aproximen el comportament del panell fotovoltaic mitjançant equacions. Entre ells es troben els següents:

- Una font de corrent i un díode en antiparal·lel.
- Una font de corrent, un díode en antiparal·lel i una resistència en sèrie.
- Una font de corrent, un díode en antiparal·lel, una resistència en sèrie i una en paral·lel.
- Una font de corrent, dos o més díodes en antiparal·lel i les resistències en sèrie i paral·lel.

El model que s'ha utilitzat en aquest projecte és el tercer perquè ja és prou complet i proporciona una aproximació més que suficient del comportament del panell fotovoltaic, és a dir, dona un valor força correcte dels valors de voltatge en els seus punts característics (V_{oc} , I_{sc} , V_{mpp} i I_{mpp}).



Il·lustració 2.2. Model del circuit fotovoltaic amb díode, resistència en sèrie i paral·lel [2]

Una de les formes més típiques de descriure les corbes I-V del panell és amb els components del circuit equivalent del model. L'equació 2.1 defineix la intensitat mitjançant la llei de corrent de Kirchoff.

$$I_{out} = I_{PV} - I_D - I_{SH} \quad (2.1)$$

La qual també es pot expressar de la següent forma:

$$I_{out} = I_{PV} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_S}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + I_{out} \cdot R_S}{R_{SH}} \right) \quad (2.2)$$

On:

$$V_{TSTC} = \frac{k \cdot T}{q} \quad (2.3)$$

2.1.3. Mètodes per determinar els paràmetres desconeguts

Un cop desenvolupada l'equació inicial apareixen nous paràmetres amb valor desconegut que necessiten ser solucionats. Aquest són la I_{O} , I_{PV} , R_S , R_{SH} i A que poden ser resolts mitjançant el sistema de 5 equacions i 5 incògnites descrit per les equacions que van de la 2.4 a la 2.8.

La primera, segona i tercera equació són com la 2.2 aplicada quan el panell fotovoltaic està curtcircuitat (intensitat màxima i tensió nul·la), en circuit obert (Tensió màxima i intensitat nul·la) i al punt de màxima potència o “*Maximum Power Point*” respectivament. Aquests han d'estar respecte les STC (“*Standard Test Condition*”).

$$I_{out} = I_{SC} = I_{PV_{STC}} - I_{O_{STC}} \cdot \left[\exp\left(\frac{I_{SC} \cdot R_S}{A \cdot V_{T_{STC}}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{I_{SC} \cdot R_S}{R_{SH}}\right) \quad (2.4)$$

$$I_{out} = 0 = I_{PV_{STC}} - I_{O_{STC}} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{OC}}{A \cdot V_{T_{STC}}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{OC}}{R_{SH}}\right) \quad (2.5)$$

$$I_{out} = I_{mpp} = I_{PV_{STC}} - I_{O_{STC}} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{mpp} + R_{SH} \cdot I_{mpp}}{A \cdot V_{T_{STC}}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{mpp} + R_S \cdot I_{mpp}}{R_{SH}}\right) \quad (2.6)$$

Les altres dues equacions s'obtenen de forma indirecta. La quarta es basa amb que la derivada de la potència respecte el voltatge al MPP és 0 i la última en que la pendent de la corba en curtcircuit és igual a $(-1/R_{SH})$. L'obtenció d'aquestes equacions es pot veure a la referència 3.

$$\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = \frac{\frac{I_{O_{STC}}}{A \cdot V_{T_{STC}}} \cdot \exp\left(\frac{V_{mpp} + R_{SH} \cdot I_{mpp}}{A \cdot V_{T_{STC}}}\right) + \frac{1}{R_{SH}}}{1 + \frac{I_{O_{STC}}}{A \cdot V_{T_{STC}}} \cdot \exp\left(\frac{V_{mpp} + R_{SH} \cdot I_{mpp}}{A \cdot V_{T_{STC}}}\right) + \frac{R_S}{R_{SH}}} \quad (2.7)$$

$$0 = \frac{-\frac{I_{O_{STC}}}{A \cdot V_{T_{STC}}} \cdot \exp\left(\frac{V_{mpp} + R_{SH} \cdot I_{mpp}}{A \cdot V_{T_{STC}}}\right) + \frac{1}{R_{SH}}}{1 + \frac{I_{O_{STC}}}{A \cdot V_{T_{STC}}} \cdot \exp\left(\frac{V_{mpp} + R_{SH} \cdot I_{mpp}}{A \cdot V_{T_{STC}}}\right) + \frac{R_S}{R_{SH}}} + \frac{1}{R_{SH}} \quad (2.8)$$

Per resoldre l'anterior sistema d'equacions es pot utilitzar un mètode com el de Newton Raphson mitjançant MATLAB.

Una altra forma d'aconseguir els paràmetres és fent una aproximació de cada un d'ells. Aquest mètode també és vàlid i facilita notablement l'obtenció dels valors al no necessitar cap mètode de resolució complex, i està descrit a continuació.

En primer lloc, les resistències en sèrie es poden obtenir experimentalment dels punts de circuit obert de la corba I-V i les resistències en paral·lel dels punts de curtcircuit. Els valors de les resistències és la derivada del voltatge entre la derivada d'intensitat.

$$R_{SO} = \frac{dV}{dI} \big|_{V=V_{OC}} \quad (2.9)$$

$$R_{SHO} = \frac{dV}{dI} \big|_{I=I_{SC}} \quad (2.10)$$

Un cop aconseguit els valors de les resistències es pot calcular el factor d'idealitat del díode mitjançant la relació establerta a l'equació 3.11.

$$A = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_{SO} - V_{OC}}{V_{TSTC} \cdot \left[\ln \left(I_{SC} - \frac{V_{mpp}}{R_{SHO}} - I_{mpp} \right) - \ln \left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{SHO}} \right) \right] + \frac{I_{mpp}}{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{SHO}}}} \quad (2.11)$$

Amb el factor d'idealitat del díode conegut, la resta de paràmetres es troben fent ús de les següents equacions. La resistència en paral·lel no presenta cap variació significativa en diferents punts de la corba, per tant es deixa constant.

$$R_{SH} = R_{SHO} \quad (2.12)$$

$$I_{O_{STC}} = \left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \right) \cdot e^{\left(-\frac{V_{OC}}{A \cdot V_{TSTC}} \right)} \quad (2.13)$$

$$R_S = R_{SO} - \frac{A \cdot V_{TSTC}}{I_O} \cdot e^{\left(-\frac{V_{OC}}{A \cdot V_{TSTC}} \right)} \quad (2.14)$$

$$I_{PV_{STC}} = I_{SC} \cdot \left(1 + \frac{R_S}{R_{SH}} \right) + I_{O_{STC}} \cdot \left(e^{\left(-\frac{I_{SC} \cdot R_S}{A \cdot V_{TSTC}} \right)} - 1 \right) \quad (2.15)$$

2.1.4. Efecte de la irradiància i la temperatura en la corba I-V i P-V

La irradiància, de la mateixa forma que la temperatura, causa un efecte tant en la intensitat com en el voltatge. La intensitat de curtcircuit varia gairebé de forma proporcional a la irradiància, mentre la tensió de circuit obert només es veu afectada lleugerament. En el model escollit, la irradiància solament afectarà a la I_{PV} tal com és veu a l'equació 2.16.

$$I_{PV} = (I_{PV_{STC}} + K_i \cdot \Delta T) \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (2.16)$$

La temperatura, a diferència de la irradiància, causa un efecte més notori en la tensió que en la intensitat. A menor temperatura el voltatge del circuit obert s'incrementa significativament, mentre que la intensitat disminueix. Aquest última varia tant poc que fins i tot s'arriba a negligir en alguns casos. Pel que fa a la model la temperatura afecta a la I_o , al V_T i a la I_{PV} de les equacions anteriors.

$$V_T = V_{T_{STC}} \cdot \frac{T_{STC}}{T} \quad (2.17)$$

$$I_o = I_{o_{STC}} \cdot \left(\frac{T_{STC}}{T}\right)^3 \cdot e^{\left(\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (2.18)$$

Els paràmetres que porten al subíndex STC es refereixen a aquelles mesures que s'han pres a una temperatura de 25°C (298,15 K), una irradiància de 1000 W/m² i una massa d'aire de 1,5.

2.1.5. Mètode numèric de resolució del model

La corrent de sortida es pot conèixer únicament quan s'han obtingut tots els altres valors dels paràmetres presents en l'equació 2.2. La corrent de sortida serveix per definir les corbes I-V i P-V del panell fotovoltaic.

Com l'equació no és lineal s'han d'utilitzar iteracions o aproximacions analítiques per trobar la solució. L'article^[2] en el que s'ha basat per modelar el panell utilitza el mètode de Newton-Raphson el qual consisteix en trobar aproximacions del zero de la funció $f(I_{out}) = 0$ mitjançant una equació iterativa.

$$I_{out_{n+1}} = I_{out_n} - \frac{f(I_{out_n})}{f'(I_{out_n})} \quad (2.19)$$

On:

$$f(I_{out}) = I_{out} - I_{PV} + I_o \cdot e^{\frac{V + I_{out} \cdot R_S}{A \cdot V_T}} + \frac{V + I_{out} \cdot R_S}{R_{SH}} - I_o \quad (2.20)$$

$$f'(I_{out}) = 1 + \frac{I_o \cdot R_S}{A \cdot V_T} \cdot e^{\frac{V + I_{out} \cdot R_S}{A \cdot V_T}} + \frac{R_S}{R_{SH}} \quad (2.21)$$

Aquest procés iteratiu es conclou quan la variació entre la iteració n+1 i la iteració n arriba a un valor relativament petit.

2.2. Corbes del panell fotovoltaic

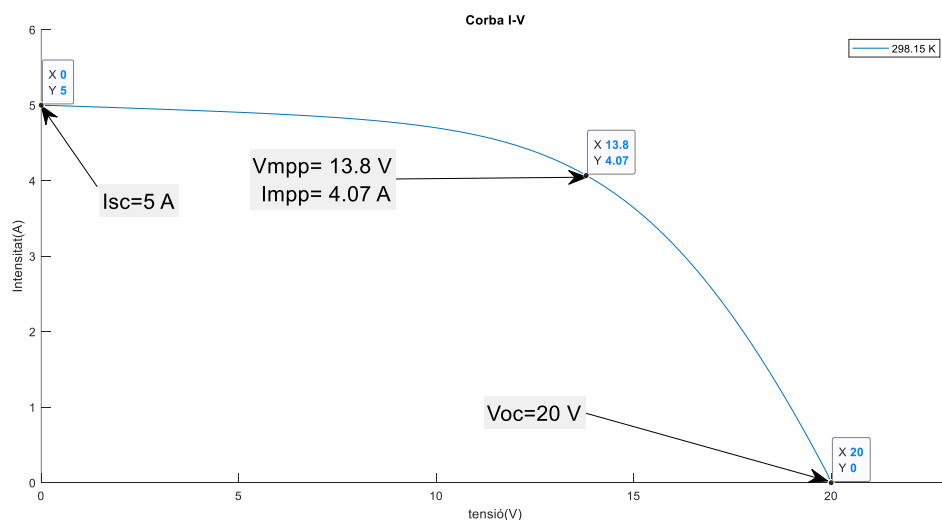
2.2.1. Representació de les corbes fotovoltaïques

Anteriorment s'ha comentat que el panell fotovoltaic tenia una relació no lineal entre el voltatge i la intensitat, és a dir, que al augmentar progressivament una resistència externa o modificar qualsevol dispositiu que actuï com ella (al canviar el "Dutty cycle" d'un convertidor) generà una corba entre el voltatge i la intensitat.

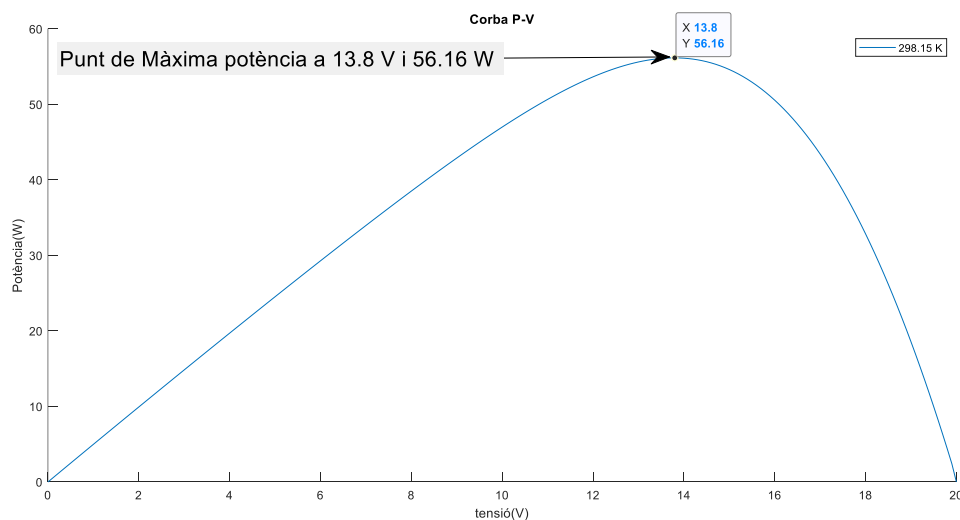
El fet d'utilitzar un model matemàtic per caracteritzar el panell ens permet obtenir els valors de V_{oc} , V_{mpp} , I_{mpp} i I_{sc} que són els que permeten generar la corba pròpia d'un panell fotovoltaic en el simulador. Com el model matemàtic funciona respecte la temperatura i irradiància es podrà aconseguir els punts característics de qualsevol corba.

A més, el model del panell també dona una tensió per cada valor d'intensitat fent possible la creació d'una gràfica I-V del model del panell, la qual ha de coincidir amb la que emularia el simulador fotovoltaic. El principal avantatge de representar-la és que facilita la comprensió del comportament del panell i alhora ajuda a veure amb claredat els seus punts característics. La corba I-V està representada a la il·lustració 2.3.

Amb els anteriors punts també es pot crear la corba P-V que té com a funció mostrar amb claredat els valors d'intensitat i tensió que fan que el panell funcioni en el punt de màxima potència. La corba P-V és representada a la il·lustració 2.4 .



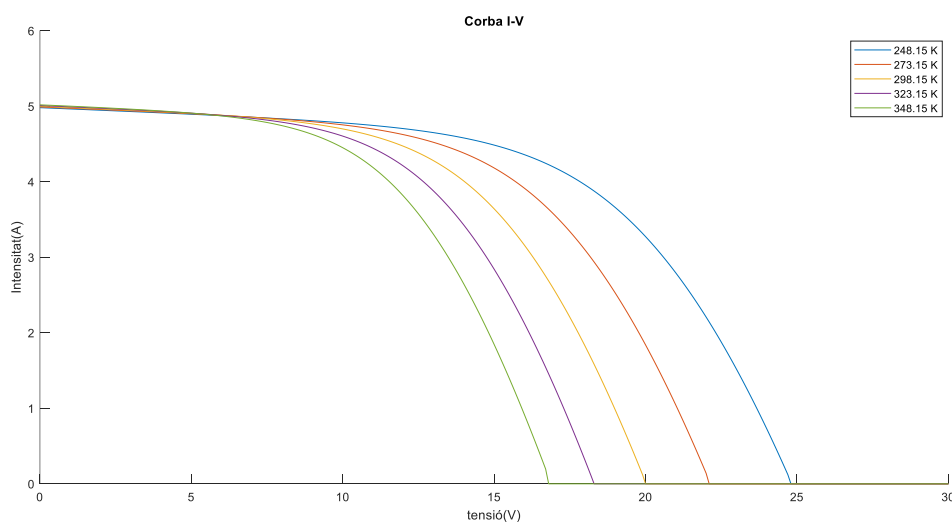
Il·lustració 2.3. Corba I-V en condicions STC



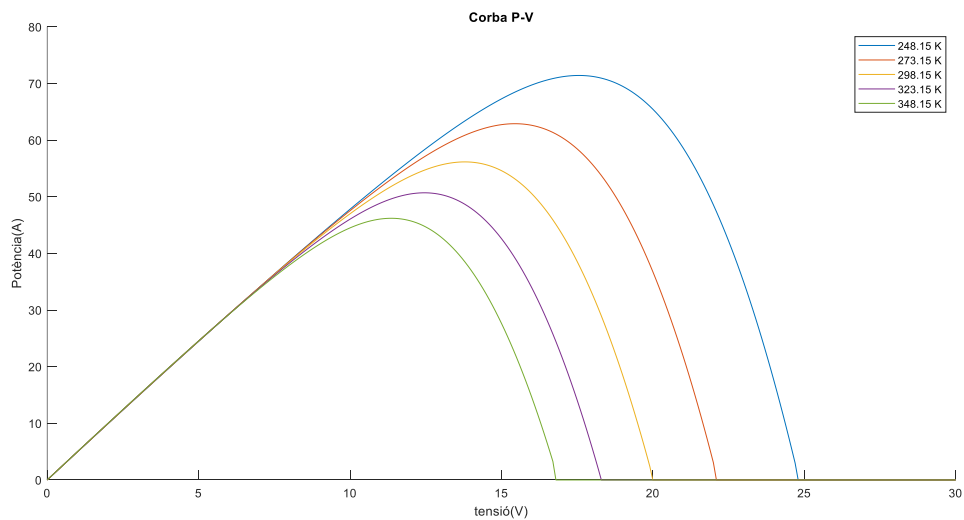
Il·lustració 2.4. Corba P-V en condicions STC

2.2.2. Corbes respecte la variació de la temperatura i la irradiància

La següent imatge mostra la variació de la corba I-V i P-V respecte diferents temperatures mentre que la irradiància es manté constant a 1000W/m^2 . En aquest cas es pot comprovar com a menors temperatures el voltatge creix significativament mentre que la intensitat pràcticament es manté constant, únicament presenta una petita reducció. És a dir, la potència és més gran a temperatures més baixes.

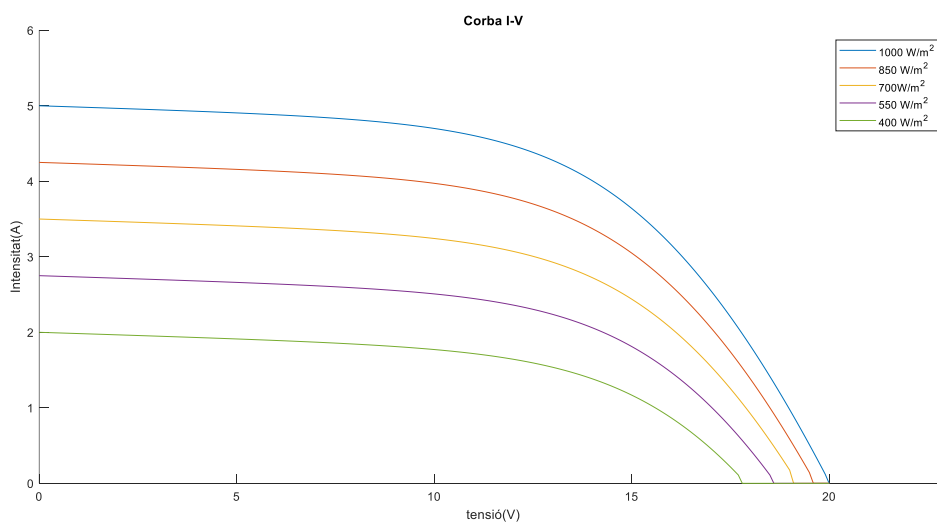


Il·lustració 2.5. Gràfica I-V a diferents temperatures (K) i 1000W/m^2

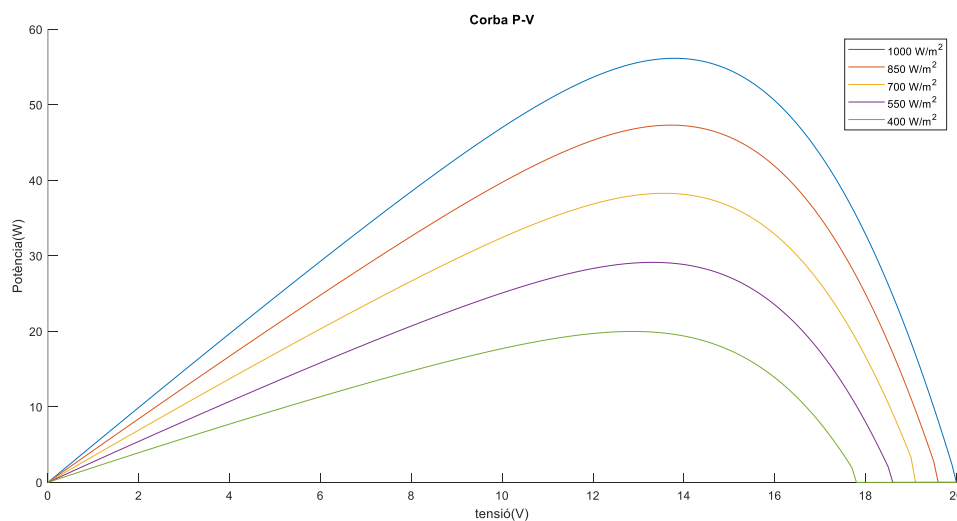


Il·lustració 2.6. Gràfica P-V a diferents temperatures (K) i 1000W/m²

Les il·lustracions 2.7 i 2.8 mostren la variació d'irradiància a temperatura constant (25°C). En elles es pot comprovar com a major irradiància més alt és el valor del voltatge, intensitat i potència.



Il·lustració 2.7. Corba I-V per diferents irradiàncies a 298,15 K



Il·lustració 2.8. Corba P-V per diferents irradiàncies a 298,15 K

2.3. Algorismes de seguiment del punt de màxima potència

2.3.1. Algorismes MPPT

Els algorismes de rastreig del punt de màxima potència (MPPT) s'utilitzen en els sistemes fotovoltaics per maximitzar la seva potència de sortida donat que aquest punt va variant al dependre en gran mesura de la irradiància i temperatura. Per contrastar la utilitat d'aquests, segons articles com el de la referència 4 comenten que permeten incrementar l'eficiència del sistema fotovoltaic entre un 20% i un 30%. A més tots aquests són fàcilment aplicables en convertidors DC-DC, inversors i fins i tot en "DC electronic loads".

Degut als avantatges que proporcionen els algorismes de seguiment del punt de màxima potència, els últims anys han sorgit un gran nombre d'ells. En aquest apartat es farà una breu menció als que detecten únicament un punt de màxima potència, els quals són els més comuns.

Entre els algorismes MPPT més utilitzats es troben el de "Perturb and Observe" (P&O), el de "Hill Climbing" (HC) i la "Incremental Conductance" (IC). Els tres tenen una fàcil implementació, un cost reduït i proporcionen un correcte rastreig del punt de màxima potència quan la irradiància és uniforme en un conjunt de panells en sèrie. A més, no necessiten saber prèviament les especificacions i comportament del panell fotovoltaic per tenir un correcte funcionament.

Els dos primers algorismes anomenats anteriorment tenen el mateix principi de funcionament que es basa en provocar periòdicament una pertorbació en el “Duty Cycle” o en el Voltatge per comprovar si la potència creix o decreix. Les pertorbacions del sistema estan marcades per un valor fixat del “step” que serà positiu o negatiu depenent de la reacció que causi en el sistema. Els “steps” provoquen que el voltatge o el “Duty Cycle”, depenent del component que reguli el MPP, creixi o decreixi per cada iteració del algorisme.

El P&O actua directament en el canvi de voltatge del panell per comprovar si la potència creix o decreix i, en funció del resultat, disminuirà o augmentarà el voltatge. Això, a mesura que es va repetint, ocasiona que la tensió, i per tant la corrent del panell, s’aproximi al punt de màxima potència. Com a principals avantatges es troba el fet de ser simple i tenir una bona resposta quan la temperatura i/o irradiància canvien suaument. Per contra, l’algorisme pot fer un seguiment a una direcció errònia quan la irradiació canvia ràpidament. A més consta de fluctuacions entre el punt de màxima potència, sent aquest inconvenient compartit pels tres algorismes.

Pel que respecta al Hill Climbing , el seu principi es basa en ampliar o reduir el “Duty Cycle” del convertidor en funció de si la potència augmenta. Aquest, igual que el P&O, presenta l’avantatge de ser simple i gaudir d’un bon seguiment del punt de màxima potència. Per contra, té la problemàtica de que depenent del “step” elegit es poden generar unes pèrdues considerables d’energia. També, únicament es pot aplicar quan el panell consta d’un convertidor.

Finalment, l’Incremental Conductance parteix de que la primera derivada de la funció P-V és 0 al MPP.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \rightarrow I \cdot V = P \rightarrow \frac{dP}{dV} = V \cdot \left(\frac{dI}{dV} \right) + I = 0 \quad (2.22)$$

Deixant l’anterior relació a 0 es pot separar la part incremental i la part instantània:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.223)$$

El punt de màxima potència es troba quan les dues parts de l’anterior equació s’igualen. S’arribarà al punt de màxima potència de la mateixa forma que els dos algoritmes anteriors, és a dir, gràcies als desplaçaments provocats pel “step” en la tensió.

La part positiva d’aquest és la millora davant els canvis bruscos en la irradiància, però presenta un cost més elevat d’implantar que els altres dos.

2.3.2. Efecte de l'ombra parcial

Moltes instal·lacions fotovoltaïques tenen més d'un panell connectat en sèrie. Això fa que el voltatge d'aquests es sumi i que la intensitat que circula sigui igual per a tots ells.

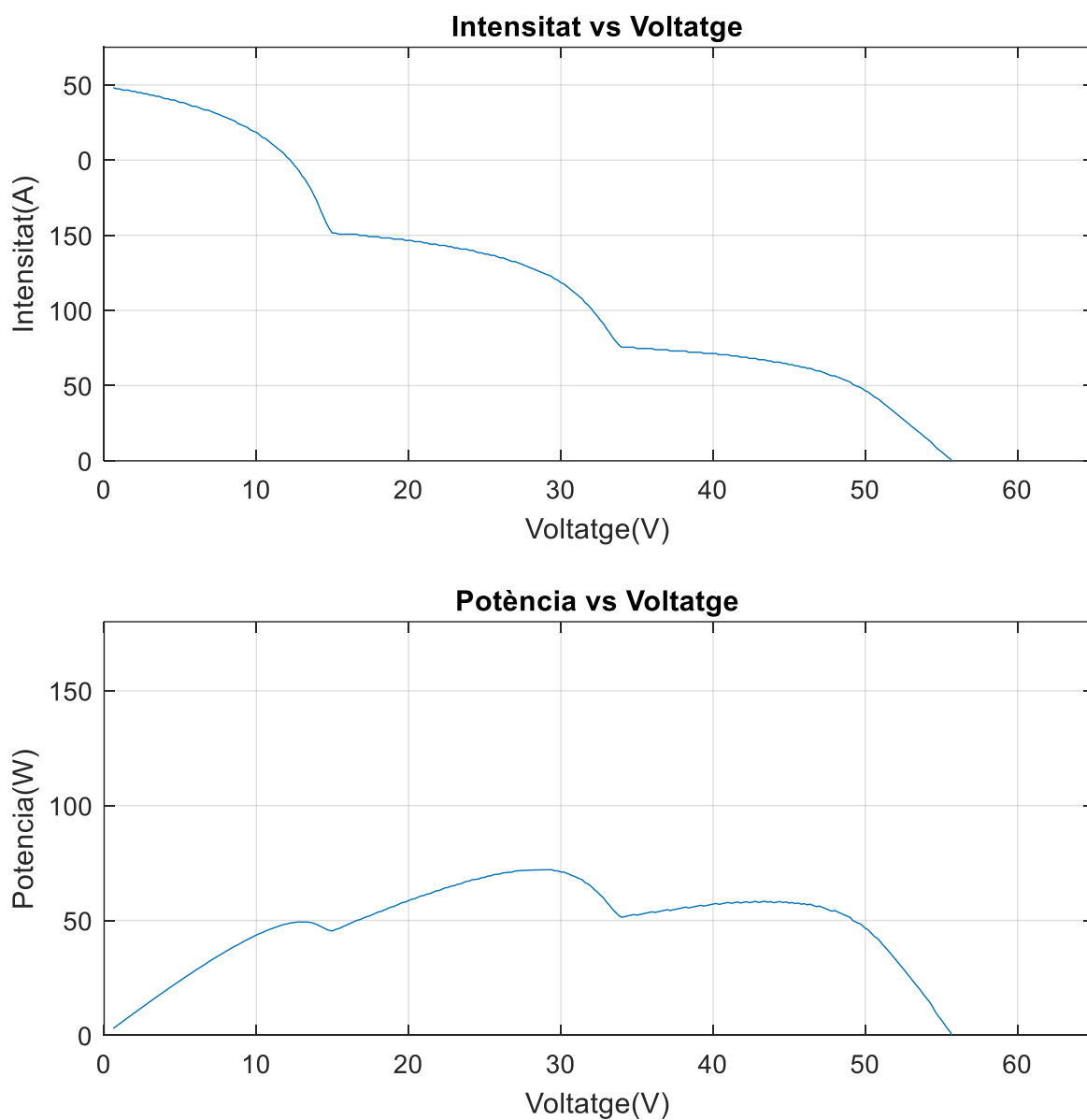
Quan la irradiància és uniforme en els panells connectats en sèrie, es genera una corba I-V i P-V molt semblant a la d'un panell aïllat, però quan apareix l'ombra parcial això deixa de ser cert. En aquest nou cas, la intensitat té salts bruscos en la corba I-V, fent que existeixi més d'un punt de màxima potencia en la corba. Quan això passa, els màxims es diferencien entre locals i global, sent la suma d'aquests com a màxim igual al nombre de panells connectats en sèrie.

Els salts bruscos venen donats perquè les irradiàncies que capten els panells, marquen la intensitat a la qual funcionen, fent que un panell ombrejat no pugi arribar a la intensitat d'un que està perfectament irradiat. Per això, si és vol fer funcionar la sèrie de panells a una determinada intensitat, els que tinguin una irradiància inferior hauran d'estar curtcircuitats mitjançant el díode de "*by-pass*".

L'efecte de les ombres parcials pot ser degut tant pel pas de núvols sobre el camp solar com per edificis, arbres, xemeneies i fins i tot els cables. Les pèrdues d'energia que sorgeixen són degudes a l'arribar menys irradiància (no es pot fer res al respecte) i degut a que el conjunt de panells no es situen al màxim global.

Partint de què els panells fotovoltaïcs tenen un cost elevat i una baixa eficiència, fan que un algorisme que segueixi correctament el punt global de màxima potencia sigui més que interessant, encara que actualment molts dels algorismes més utilitzats no saben diferenciar entre els màxims locals i el màxim absolut, entre els quals es troben els anteriors anomenats.

En la il·lustració 2.9 es pot veure la característica I-V i P-V dels panells fotovoltaïcs connectats en sèrie amb presència d'ombra parcial. En la primera corba s'aprecia com sorgeixen les tres zones d'ombrejat, les quals són degudes a que les diferents irradiàncies provoquen un salt d'intensitat força visible. En la segona corba veiem com per al mateix cas sorgeixen els tres màxims i com el GMPPT se situa al segon pic.



Il·lustració 2.9. Corba característica I-V i P-V per a panells amb presència d'ombres parcials

2.3.3. Algorismes GMPPT

L'anàlisi i la mitigació de les ombres parcials ja consta de nombroses recerques, en les quals son proposats nous algorisme que permeten trobar el punt global de màxima potència i solucionar el problema que comporta l'ombra parcial. Les diferències entre cada un d'ells radica en la complexitat,

la velocitat de convergència, el preu i l'efectivitat. Degut a les millores que comporten alguns fabricants de convertidors i inversors comencen a estar interessats amb ells. ^[5]

Els mètodes de seguiment del GMPPT es poden diferenciar en dos grans grups, el que ho fan mitjançant hardware i els que ho fan amb software. En aquest projecte no es parlarà dels primers perquè necessiten de més dispositius per funcionar la qual cosa es tradueix en uns costos molt més elevats.

Alguns articles categoritzen els mètodes de seguiment del GMPPT mitjançant software en 3 categories diferenciades. Aquests són els “*soft computing*”, els “*segmentals*” i els “*two-stage*”. ^[6]

En la primera es situen mètodes intel·ligents que són difícils d'implementar en sistemes comercials al constar d'una gran càrrega de càlculs per tal de funcionar. Aquesta, inclou algorismes basats en l'optimització per eixam de partícules, en lògica difusa, en la colònia d'abelles artificials i en l'evolució diferencial entre d'altres.

En la segona categoria es troben mètodes que són originats de teories matemàtiques com les de dividir rectangles, la tècnica de Fibonacci o el punt central d'iteració. Aquests comencen seleccionant un rang d'exploració, el qual és va reduint fins trobar el punt global de màxima potència. Els algorismes que es basen en aquestes tècniques són fàcils d'implementar, però poden passar-se per alt el GMPPT quan el segment seleccionat no és gaire precís.

L'última gran categoria està basada en un mètode de dos etapes, en el qual es troben algorismes relacionats amb una determinada fracció del voltatge de circuit obert (V_{oc}). En la primera etapa d'aquests es determina de forma aproximada la localització del GMPPT a través dels màxims locals i en la segona s'aplica un algorisme convencional de MPPT com el P&O o el IC per localitzar amb més detall el màxim absolut. Els algorismes dintre d'aquesta categoria tenen una gran eficiència i velocitat de rastreig, però per contra necessiten saber el comportament dels panells (s'ha de conèixer la tensió en circuit obert), presenten fluctuacions al voltant del punt global de màxima potència i deixen de funcionar correctament quan en la instal·lació hi ha més de 5 plaques fotovoltaïques connectades en sèrie.

3. Equips necessaris per realitzar la simulació.

3.1. Hardware

En una comparació justa entre diferents algorismes és necessari que les condicions no variïn per diferents simulacions donat que els resultats no serien concloents. Per això, s'utilitzaran emuladors fotovoltaics els quals poden repetir de forma fàcil i ràpid les corbes que s'han programat.

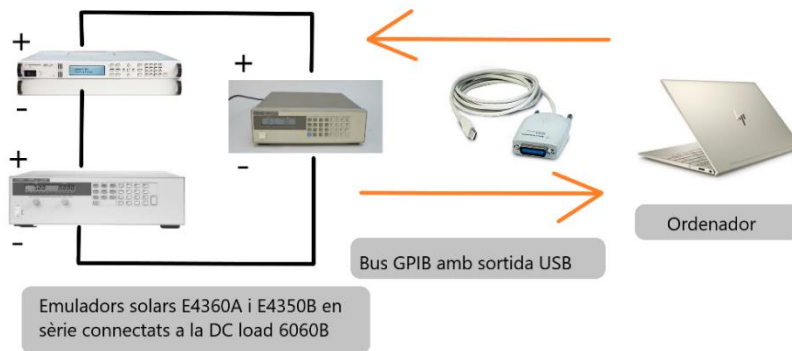
Per la comparativa dels algorismes GMPP s'han utilitzat tres emuladors fotovoltaics connectats en sèrie i s'han escollit tres per tal de poder veure amb més claredat les diferents característiques del conjunt de panells.

L'equip necessari encarregat de situar el panell en qualsevol punt de la seva corba I-V serà la càrrega activa o electrònica. Aquesta, a l'igual que els emuladors, és programable i amb l'ajut de l'algorisme modificarà la tensió de sortida fins arribar al punt global de màxima potència. De la mateixa forma també s'hauria pogut utilitzar un convertidor DC-DC en el qual modificant el "*Duty Cycle*" s'arribaria al mateix punt.

L'ordenador serveix tant per programar els paràmetres que defineixen la característica i-V del panell com del mateix controlador GMPP. Aquest, de forma breu, és el responsable de que els diferents elements es puguin comunicar entre ells.

Finalment, el dispositiu que té la funció de connectar els emuladors fotovoltaics, la càrrega activa i l'ordenador entre ells és el bus GPIB. Aquest permet la comunicació entre els diferents dispositius i consta d'una sortida tipus USB per poder connectar-se al PC.

L'esquema del sistema és pot veure en la il·lustració 3.1.



Il·lustració 3.1. Esquema dels dispositius utilitzats en el projecte.

3.2. Connexions entre els instruments

Tots els instruments utilitzats en aquest projecte són pràcticament del mateix fabricant, la qual cosa facilita notablement les connexions entre ells. La càrrega electrònica és de Hewlett Packard i els emuladors són de l'empresa Agilent. Aquesta última es va formar com una divisió de HP, sent tots els productes compatibles entre ells.

Els emuladors fotovoltaics utilitzats en les simulacions són els models E4350B i E460A. L'últim dels anteriors permet dos canals, fent que amb un dispositiu de cada s'assoleixi emular el comportament dels 3 panells. La connexió elèctrica és en sèrie i a més es col·loca un díode de "by-pass" en cada dispositiu o canal per tal de permetre curtcircuitar el simulador del panell si es considerés necessari. El càtode del díode ha d'apuntar al pol positiu del panell.

Els dos models d'emuladors i la càrrega electrònica consten d'un port GPIB que permet la comunicació amb l'ordinador. Tots aquests s'uniran a un bus GPIB/USB que permet la comunicació entre l'ordinador i els instruments.

3.3. Software utilitzat

El programa dedicat per interactuar amb els instruments mitjançant l'ordinador és el "Keysight connection expert". És l'encarregat de detectar els instruments com d'assignar i modificar qualsevol adreça dels equips utilitzats.

El software que s'ha utilitzat per programar els algorismes, generar gràfics, crear funcions, comunicar-se amb els instruments, modelitzar el panell fotovoltaic i realitzar càlculs complexos per tal d'obtenir certs paràmetres ha estat el Matlab.

Per fer que mitjançant el Matlab es pugui enviar i llegir dades dels instruments s'utilitzarà l' "*Instrument Control Toolbox*", el qual permet connectar els instruments mitjançant comandes SCPI.

Les principals interaccions entre els instruments i el PC seran bàsicament 3.

- Enviar els punts que necessita el emulador fotovoltaic per generar una corba, els quals són la tensió en circuit obert, la corrent en curtcircuit i el voltatge i tensió en el punt de màxima potencia.
- Llegir la intensitat i voltatge que ens dona la carga electrònica cada un dels panells.
- Enviar la tensió desitjada a la carga electrònica, ja que és allí on s'apliquen els algorismes utilitzats en el projecte.

La comanda utilitzada en Matlab per comunicar-se amb l'instrument és el "*fprtnf*", i la per llegir el que envia l'instrument és el "*fscanf*".

4. Simulació inicial

La simulació inicial es basa amb mostrejar tota la suma de les corbes per diferents conjunts d'irradiàncies. Això permet comprovar experimentalment on se situa el verdader màxim de la corba i conèixer els valors relatius al voltatge, intensitat i potència. També, al determinar el màxim d'aquesta forma, fa possible comparar l'eficiència dels algorismes que s'utilitzaran a posteriori.

Al simular els algorismes en corbes diferents es comprova realment la seva versatilitat, rapidesa en establir-se, fluctuacions entre el màxim, resposta davant de canvis lleugers i pronunciats i, fins i tot, si consta d'un error permanent que fa impossible assolir el punt global de màxima potència.

Les corbes utilitzades en aquest projecte poden ser diferenciades en dos escenaris, un estàtic i l'altre dinàmic. El primer té la funció de comprovar la rapidesa de l'algorisme, la estabilitat del sistema, l'error que pot presentar i la resposta davant grans canvis entre escenaris. Per altra banda, el segon comprovarà si l'algorisme pot fer un seguiment correcte del GMPP davant de petits canvis entre els escenaris i si la velocitat de convergència és prou elevada per fer front al canvi continu entre escenaris.

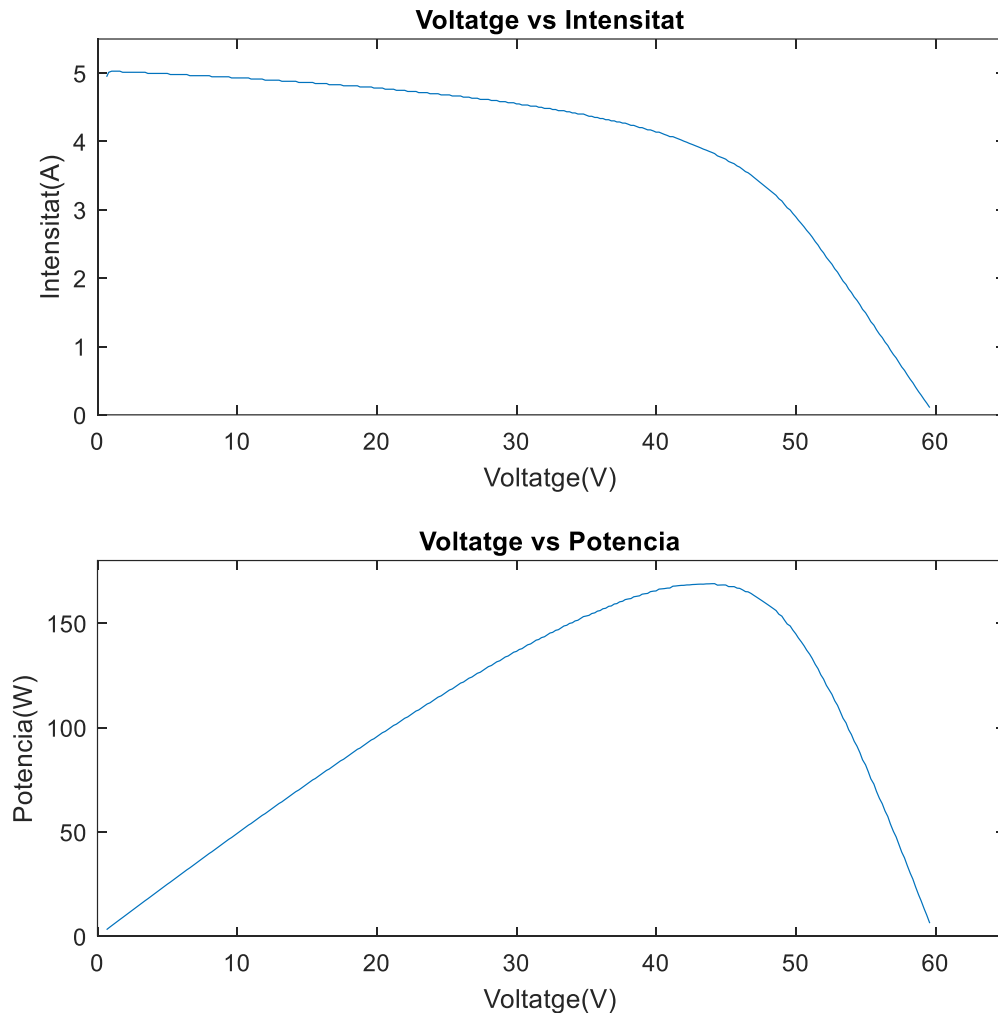
Finalment en la simulació inicial també s'ha posat mesures de seguretat per garantir que els components no s'espallin. La càrrega electrònica és el component més vulnerable, per tant se l'hi ha programat una protecció que el protegeixi davant d'altres tensions. En el programa s'ha escrit la comanada VOLT:SLIM:HIGH 20,(@1,2) que fa tornar a 0 V qualsevol tensió superior a 20 V que surti d'un dels emuladors fotovoltaics. Aquesta mesura de seguretat en principi mai hauria d'activar-se degut a que les corbes del panell han estat programades per tenir un voltatge en circuit obert de 20 volts quan la irradiància és màxima, és a dir a 1000 W/m².

4.1. Escenari estàtic

Pel que respecta al regim estàtic s'han utilitzat 5 escenaris, cada un d'ells amb corbes I-V i P-V molt diferenciades. Aquestes es distingeixen en el nombre i alçada dels salts causats per les combinacions d'irradiàncies en cada un dels escenaris, les quals es poden veure perfectament en la característica de la corba I-V. També s'ha aconseguit que la localització del GMPP variï significativament en cada un d'ells per tal de comprovar el correcte funcionament del algoritme de rastreig.

El primer escenari que s'ha dut a terme és per quan els 3 panells que conformen la instal·lació tenen una irradiància de 1000 W/m². Al constar d'una irradiància uniforme no es presentarà cap salt

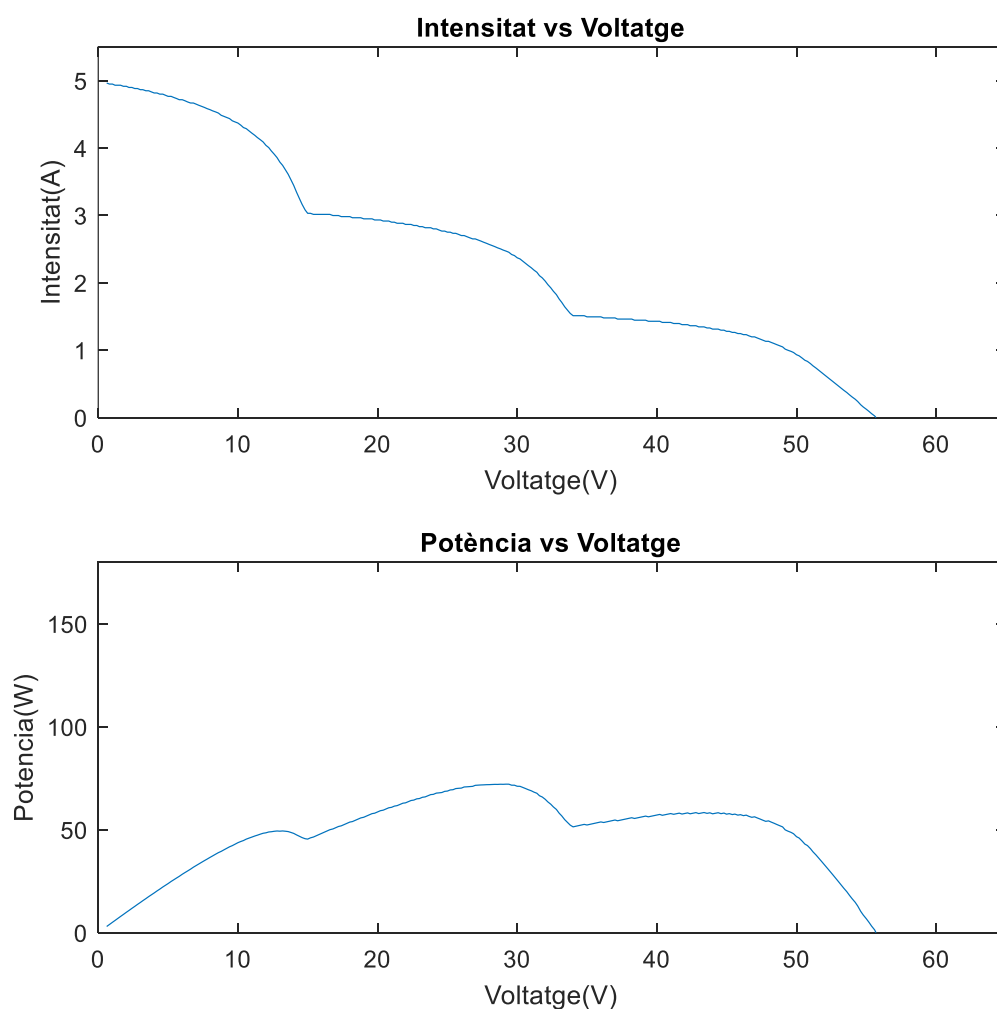
d'intensitat en la corba I-V i solament hi haurà un màxim de potència. Les corbes característiques són força similars a les generades per un únic panell, tal com es pot veure en la il·lustració 4.1.



Il·lustració 4.1. Escenari estàtic 1, 3 panells amb irradiància de 1000 W/m^2 .

Es pot veure com el GMPPT únicament té un màxim el qual es situa als 43,98 V i 3,84 A, generant 168,9 W de potència.

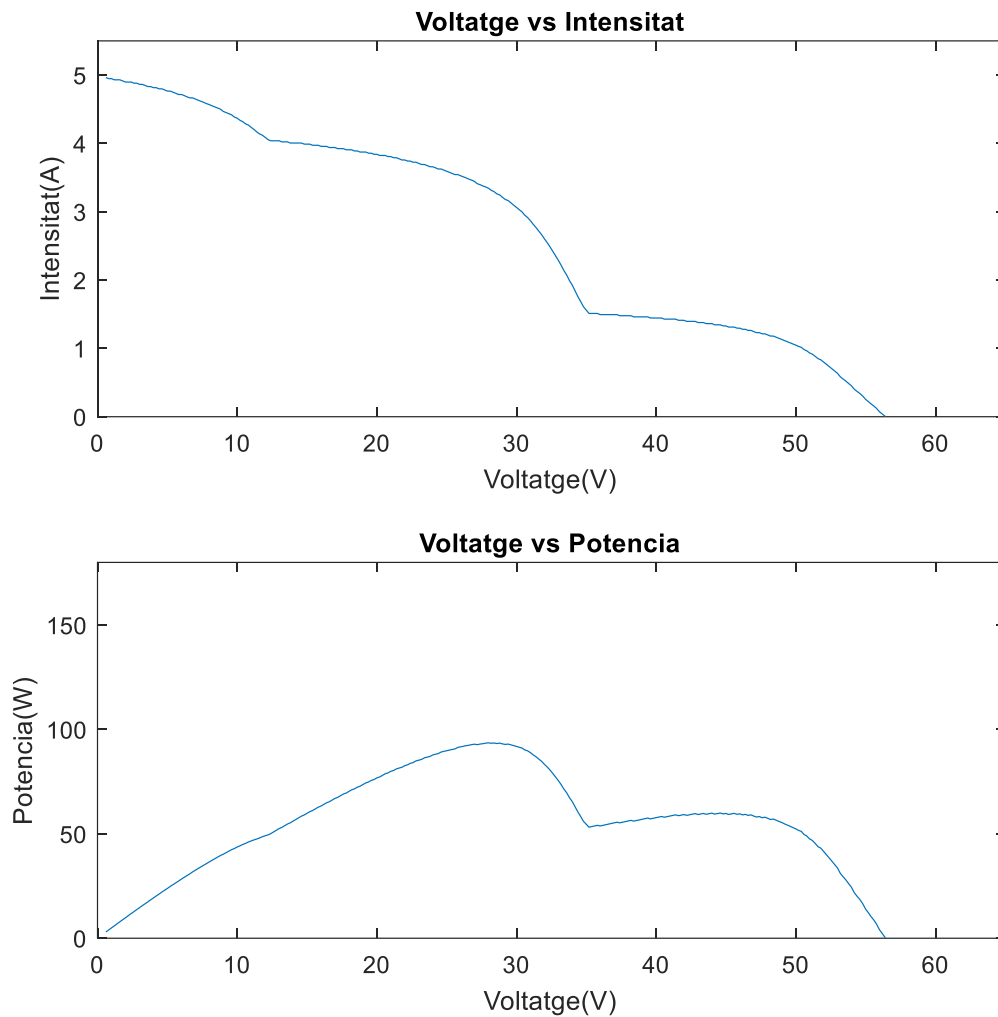
El segon escenari contempla diferents irradiàncies per cada un dels panells, les quals són 1000 , 600 i 300 W/m^2 respectivament. Degut a la distància entre els anteriors valors sorgiran 3 pics de màxima potència clarament diferenciats, tal com mostra la següent figura.



Il·lustració 4.2. Escenari estàtic 2, 3 panells amb irradiàncies de 1000, 600 i 300 W/m².

El punt global de màxima potència ja no és tan clar com en la il·lustració 5.1, situant-se al segon màxim amb un voltatge de 29,4 V i una corrent de 2,452 A que genera un total de 72,08 W.

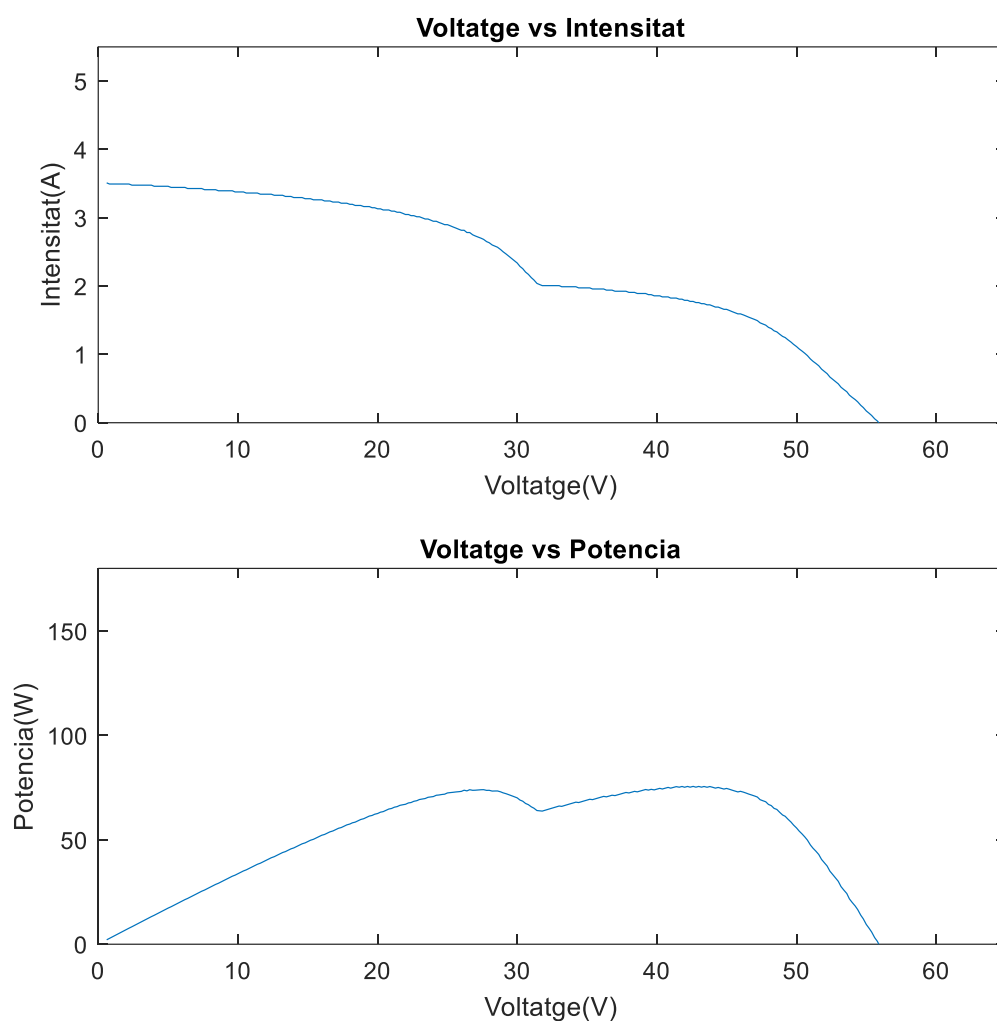
El tercer escenari també pren diferents irradiàncies per cada panell, però sent dos d'elles força properes. Aquí el primer panell s'irradia amb 1000 W/m², el segon amb 800 W/m² i l'últim amb 300 W/m². En la corba P-V solament es podran apreciar dos màxims a causa de què la diferència d'irradiància no és suficient entre els dos primers panells per generar un MPP. La il·lustració 4.3 és la que fa referència a l'escenari.



Il·lustració 4.3. Escenari estàtic 3, 3 panells amb irradiàncies de 1000, 800 i 300 W/m².

En aquest cas, el GMPPT se situa al primer màxim de la corba P-V, ja que entre els dos panells de més irradiància no es genera cap màxim local. El GMPPT es troba als 27,99 V i 3,344 A, produint 93,59 W.

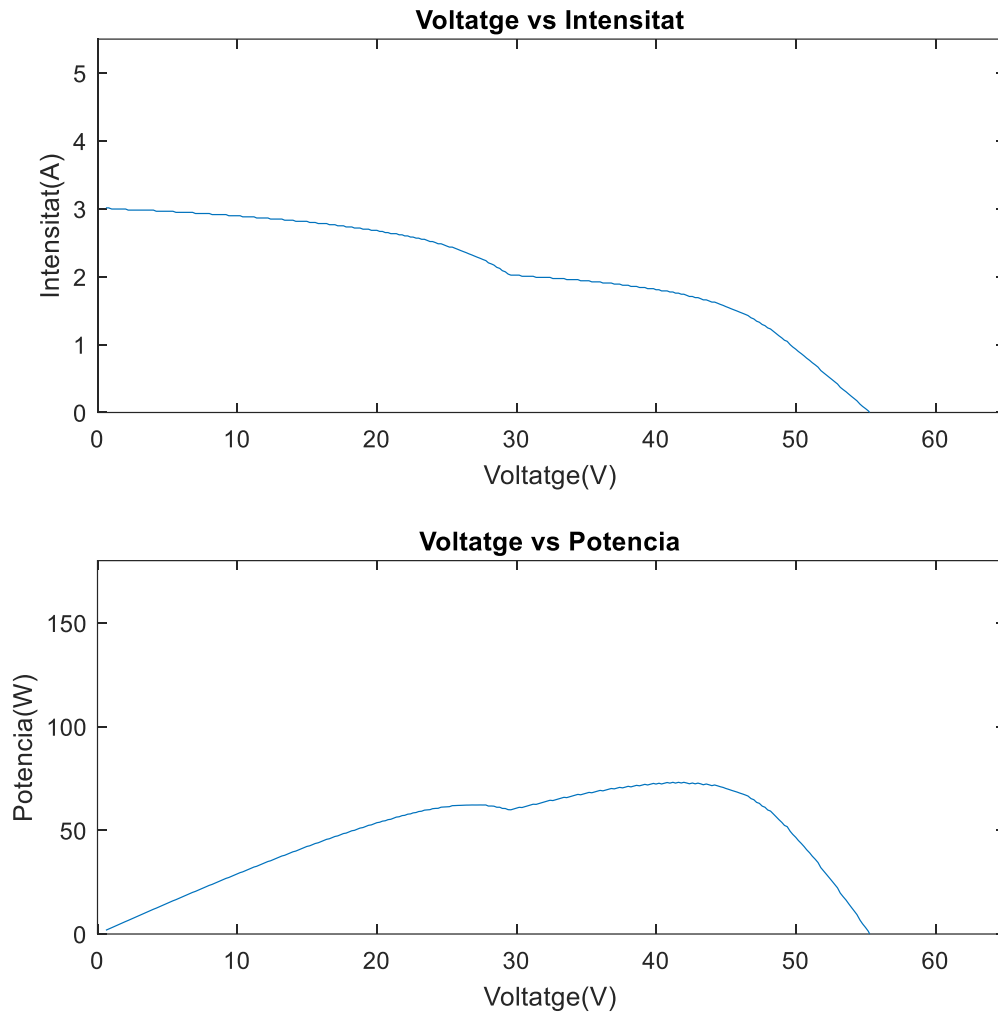
El quart escenari manté uniforme una irradiància de 700W/m² en dos panells i de 400 W/m² en el restant. Aquesta distribució d'irradiàncies, com és previsible crea únicament un salt en la corba I-V i dos màxims en la de P-V. Aquestes corbes són representades a la il·lustració 4.4.



Il·lustració 4.4. Escenari estàtic 4, 3 panells amb irradiàncies de 700, 700 i 400 W/m².

En l'anterior gràfica el GMPPT es situa al segon màxim amb 42,38 V de tensió i 1,775 A de corrent, generant una potència de 75,22 W.

Finalment, l'últim escenari és molt semblant a l'anterior. En aquest es modifiquen les irradiàncies de dos d'ells a 600 W/m² i el restant a 400 W/m². La distribució d'irradiàncies, d'igual forma que en el escenari 4, generarà solament dos punts de màxima potència i un únic salt en la corba I-V. La il·lustració 5.5 és la que fa referència a l'escenari descrit.



Il·lustració 4.5. Escenari estàtic 5, 3 panells amb irradiàncies de 400, 600 i 600 W/m².

En l'última gràfica el màxim global de potència es troba en el segon màxim a una tensió de 73,12 V i una intensitat de 1,74 A generant 73,12 W de potència.

En tots els anteriors escenaris es pot saber quants panells operen o estan curtcircuitats mirant el seu punt de funcionament, ja que aquests funcionen quan tenen suficient irradiància per fer front a la intensitat que marca el punt de voltatge.

La taula 4.1 recull els paràmetres més importants de la corba, així com els panells que han estat operant al punt global de màxima potència de cada escenari.

Escenari	1	2	3	4	5
P_{GMPP}	168,9	72,08	93,59	75,22	73,12
V_{GMPP}	43,98	29,4	27,99	42,38	41,98
I_{GMPP}	3,84	2,452	3,344	1,774	1,742
Irradiància 1	1000	1000	1000	700	400
Irradiància 2	1000	600	800	700	600
Irradiància 3	1000	300	300	400	600
Suma d'irradiàncies	3000	1900	2100	1800	1600
Panells	3	2	2	3	3

Taula 4.1. Resum dels paràmetres dels escenaris al GMPP

Com a dada curiosa, la distribució d' irradiàncies entre els panells pot fer que la potència extreta total sigui menor que una altra on la irradiància total és més petita. Això es pot veure als escenaris 2 i 5.

4.2. Règim dinàmic

Per tal de generar una espècie de regim dinàmic s'han simulat 40 escenaris els quals canvien al poc temps. El primer d'ells parteix d'un punt donat i els successius es basen amb el seu anterior sumant-li un increment d'irradiància.

En regim dinàmic els algorismes realitzaran poques iteracions en cada escenari perquè s'ha de simular canvi constant a través d'ells. A més, a diferencia dels estàtics, en aquest no es busca grans canvis d'irradiància sinó que siguin lleus.

Gràcies a aquests escenaris es comprovarà si el funcionament de l'algoritme de seguiment, la velocitat i la freqüència en què es duu el procés de cerca i si realment es posiciona al punt global de màxima potència. Aquest últim s'ha de remarcar perquè alguns cops la potència entre dos escenaris successius és gairebé igual, però el GMPP es localitza en un pic diferent que en l'anterior.

Les irradiàncies en cada un dels panells són:

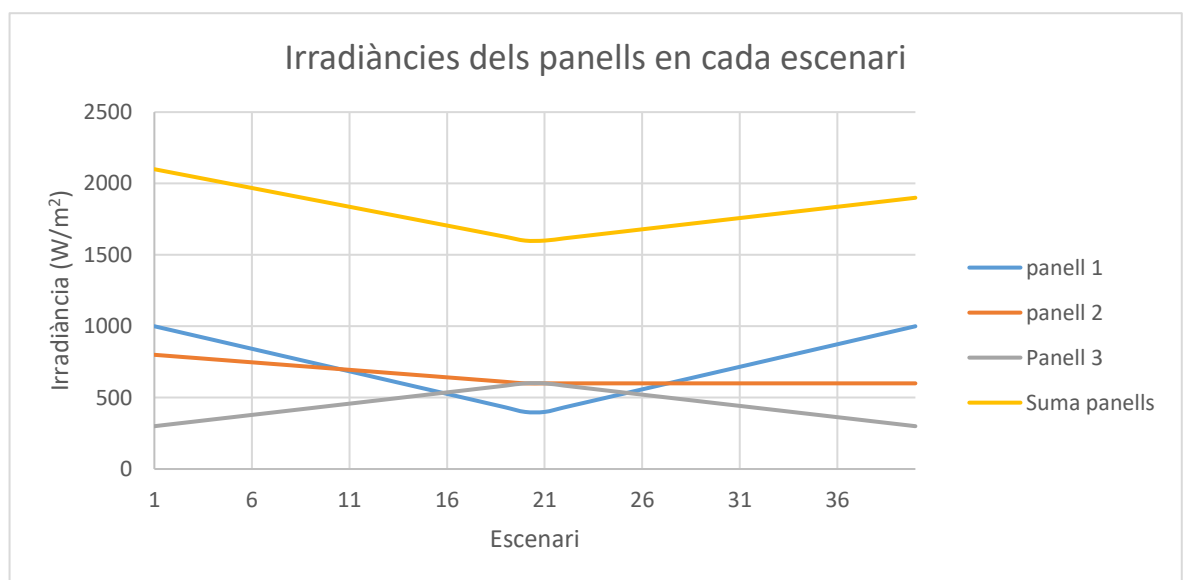
- Panell 1: Parteix de 1000 W/m² fins als 400 W/m² d'irradiància en 20 punts equidistants. Després va dels 400 W/m² fins als 1000 W/m², també en 20 punts equidistants.
- Panell 2: Parteix de 800 W/m² fins als 600 W/m² d'irradiància en 20 punts equidistants. Després durant 20 escenaris es mantindrà constant als 600 W/m².

- Panell 3: Parteix de 300 W/m² fins als 600 W/m² d'irradiància en 20 punts equidistants. Després va dels 600 W/m² fins als 300 W/m², també en 20 punts equidistants.

Mitjançant aquesta distribució d'irradiàncies s'aconsegueix que la potència creixi o decreixi de forma lleu entre els escenaris, causant que en la transició entre escenaris el pic del punt global màxim de potència canviï de lloc. És a dir, que entre un escenari i un altre la potència canviï molt poc, tot i que un panell que abans estava en funcionament passi a curtcircuitar-se o viceversa.

Els escenaris on s'aprecia el fenomen prèviament descrit són en el 9 i en el 36. Entre el escenari 8 i 9 hi ha una diferencia de potència menor a 1 W, però entre ells distarà un panell el qual començarà a funcionar en l'escenari nou. Passa d'igual forma però al revés entre els escenaris 35 i 36 on un panell es curtcircuita.

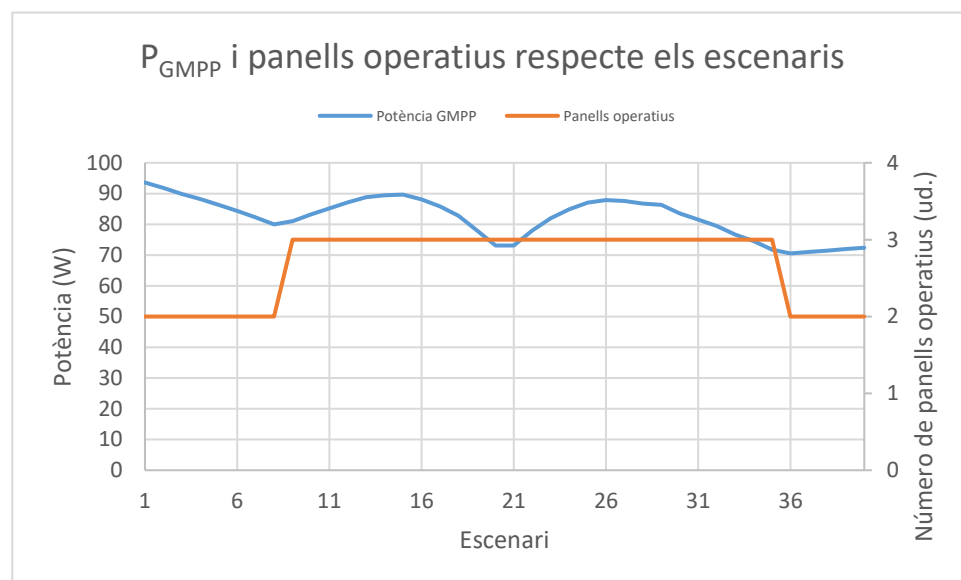
L'anterior situació provarà la capacitat d'adaptació dels algorismes davant de canvis lleugers en la irradiància. La il·lustració 4.6 mostra la distribució de les irradiàncies de cada panell respecte l'escenari.



Il·lustració 4.6. Irradiàncies dels panells per cada escenari del règim dinàmic

Aquí es veu com la suma d'irradiància va caient al llarg dels escenaris fins arribar al vint i a partir d'aquest punt torna a créixer. També, es observable com la separació entre les irradiàncies de cada panell disminueix a la zona central, això causa que en aquests punts els 3 panells estiguin funcionant mentre que als escenaris inicials i finals algun panell s'ha de curtcircuitar perquè la instal·lació operi al GMPPT.

L'altra gràfica que ajuda a la comprensió del règim dinàmic és la que engloba la P_{GMPP} i els panells operatius de cada escenari, ja que representar cada una de les corbes pròpies dels 40 escenaris acabaria dificultant la comprensió del mateix règim. Aquesta estarà representada a la il·lustració 4.7.



Il·lustració 4.7 Irradiàncies dels panells per cada escenari del règim dinàmic

5. Simulació dels algorismes

En aquest projecte s'han comparat dos algorismes GMPPT per veure quin d'ells té millor resposta davant els escenaris estàtics i dinàmics prèviament descrits.

El primer algorisme és el de $0,8 V_{OC}$ que està basat amb el mètode de *"two-stage"*. Aquest, mitjançant la fracció de la tensió de curtcircuit, delimita la regió on es localitzen els màxims i escull aproximadament quin d'ells és el màxim global. Després, s'aplica un rastrejador MMPT per trobar en més precisió el GMPP.

L'altre algorisme que s'ha estudiat és el *"Differential Evolution"* que forma part dels mètodes de *"soft computing"*, el qual mitjançant valors influïts per aleatoris acaba modificant la tensió del conjunt de panells fins situar-se al GMPPT.

La principal eina per determinar quin dels algorismes té un millor comportament és el rendiment. En aquest es compara l'energia subministrada per cada un dels algorismes i règims amb l'energia màxima que pot arribar a subministrar la instal·lació.

El règim estàtic té una durada aproximada de 140 segons i el dinàmic de 324 segons. Els valors del temps s'ha calculat amb un cronòmetre i amb les oportunes modificacions del nombre total d'iteracions dels algorismes s'han pogut quadrar els temps de simulació per cada cas.

Com cada escenari representa el mateix temps per la simulació, l'energia màxima que es pot obtenir en la instal·lació es calcula multiplicant cada P_{GMPP} amb el temps total dividit per el nombre d'escenaris.

Amb el valor obtingut de l'energia màxima possible es pot calcular la eficiència dels algorismes. Aquesta serveix per comparar-los i servir com a referència alhora de decidir quin dels dos és millor.

L'equació que defineix el rendiment és la equació 5.1.

$$\eta_{\text{algoritme}} = \frac{\text{Energia}_{\text{màxima possible}}}{\text{Energia}_{\text{algoritme}}} \quad (5.1)$$

5.1. Algorisme 0.8 V_{oc}

L'algorisme 0.8 V_{oc} forma part del mètode “Two-stage” el qual s’ha definit tal com proposa l’article de la referència^[7]. Aquest té una primera etapa que localitza el pic on es troba el màxim absolut i una segona que posiciona al panell en el seu GMPP.

El nom de 0.8 V_{oc} és degut a que es considera que el GMPP es troba en un múltiple d’aquesta fracció. En aquest es definiran regions que contindran els màxims, els quals hauran de tenir el mateix nombre que de panells connectats en sèrie. En aquest projecte al constar de 3 panells s’han de definir 3 rangs.

La primera part del 0.8 V_{oc} consisteix en fer un mostreig selectiu de la corba P-V marcat per les regions definides segons les característiques dels panells connectats en sèrie. En cada regió, mitjançant un pas de tensió, es compara l’increment d’intensitat amb el punt anterior. Quan en algun punt del rang es supera la referencia màxima de l’increment de la intensitat es considera que s’ha trobat un màxim local. Comparant la potència dels màxims locals es localitza el GMPP. L’increment d’intensitat es defineix tal com mostra l’equació 6.2.

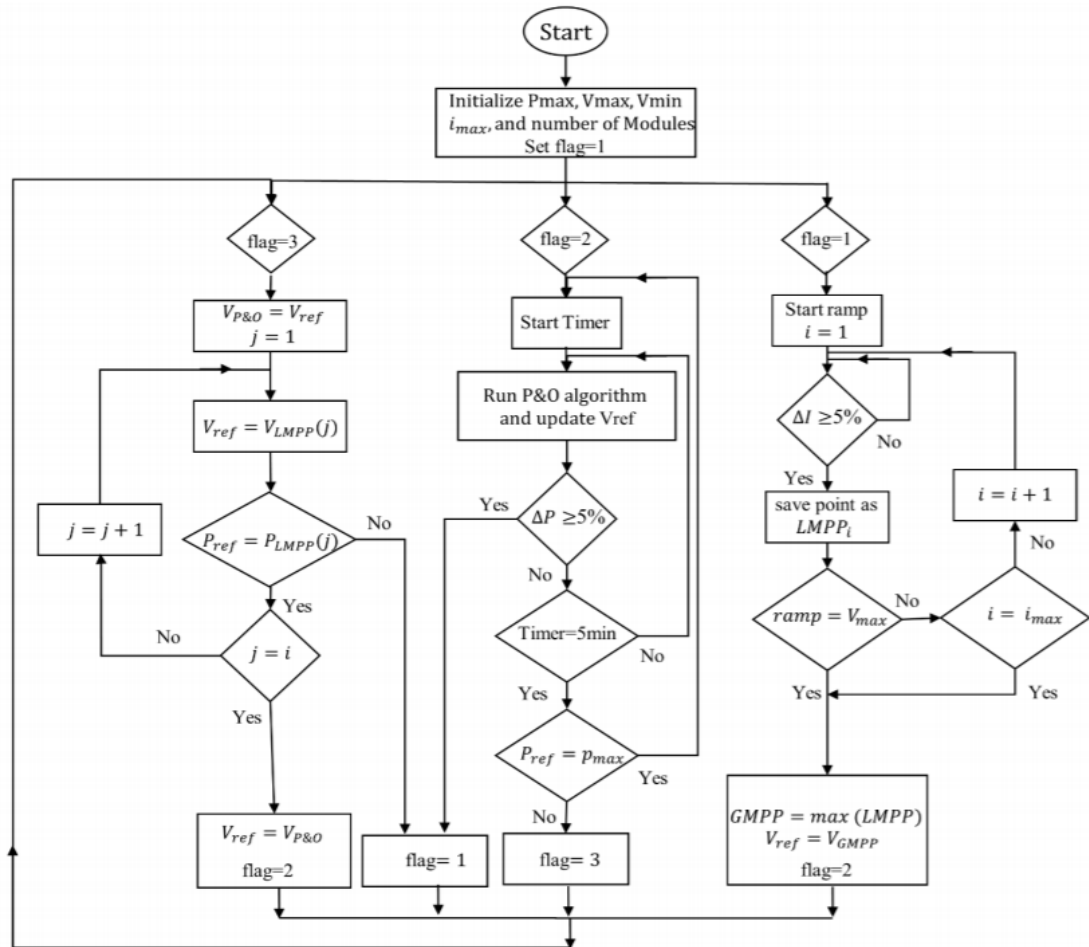
$$\Delta I = \left| \frac{I(K) - I(K - 1)}{I(K - 1)} \right| \quad (5.2)$$

La segona part es basa en aplicar l’algorisme de Pertorbació i Observació en el rang on s’ha localitzat prèviament el GMPP. Això permet trobar de forma més acurada el màxim i fer un seguiment d’ell. Igual que l’anterior etapa, aquesta també constarà d’una part de detecció d’un increment de potència que si és superat es considerarà que s’ha de tornar a cercar el màxim global. L’increment de potència es defineix tal com mostra l’equació 6.3.

$$\Delta P = \left| \frac{P(K) - P(K - 1)}{P(K - 1)} \right| \quad (5.3)$$

L’article també defineix una tercera part per abolir els punts morts on es pot embussar l’algorisme, però al ser una modificació aportada per part dels propis autors s’ha acabat obviant.

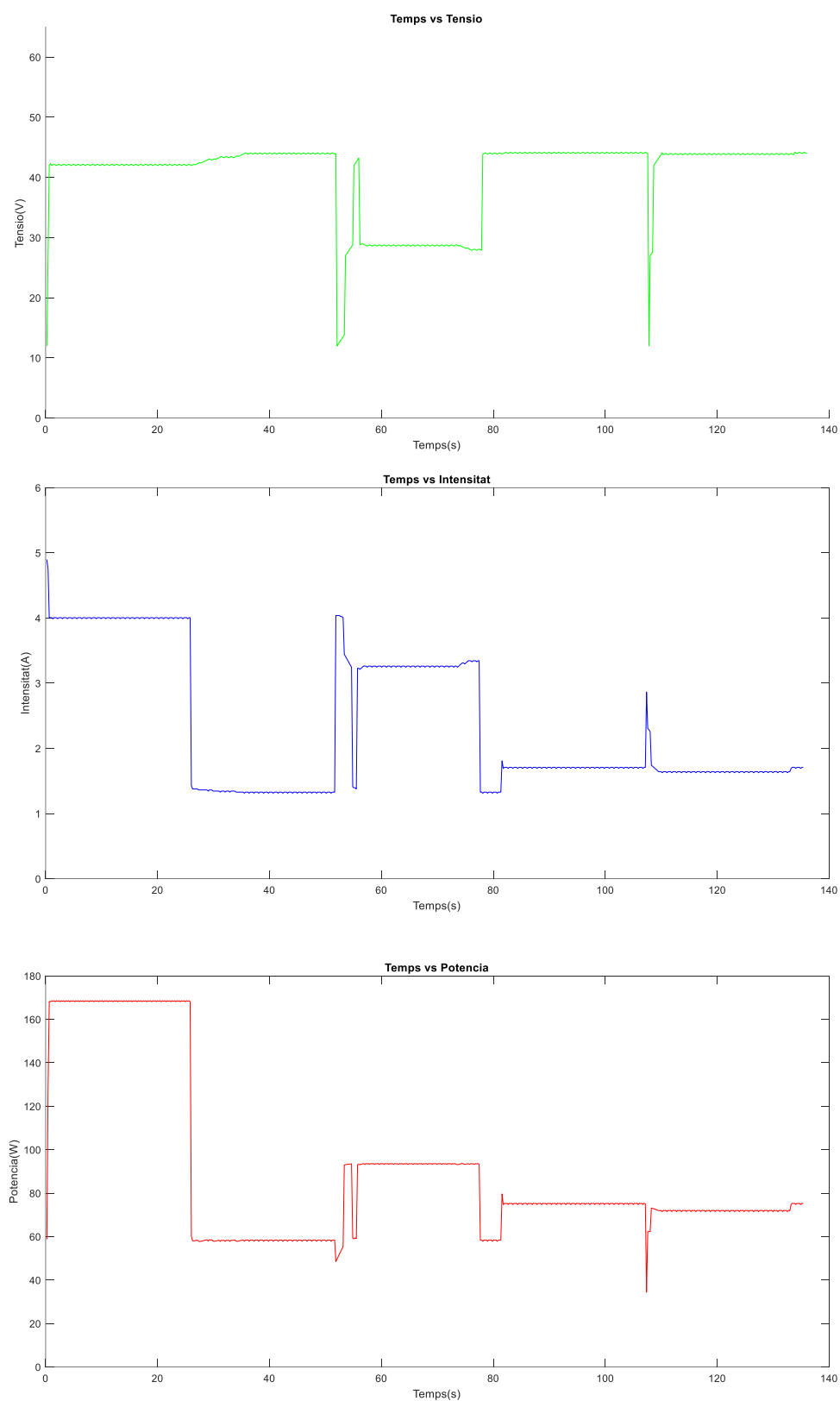
L’algorisme definit per l’article es pot veure en la il·lustració 5.1.

Il·lustració 5.1. Diagrama de flux del algoritme 0.8 V_{OC} [7].

En l'algoritme 0.8 V_{OC} a base de fer simulacions s'ha anat modificant manualment els límits dels increments d'intensitat i potència per tal d'aconseguir un bona relació entre velocitat i fiabilitat. El codi que s'ha utilitzat per programar aquest algoritme es pot veure a l' ANNEX A2.

5.1.1. Resposta davant dels escenaris estacionaris.

En les següents figures es mostra el comportament de l'algoritme envers el règim estàtic definit a l'apartat 4.1.



Il·lustració 5.2. Gràfica Tensió, Intensitat i Potència respecte el temps del algoritme $0.8 V_{OC}$ en règim estàtic.

En les anteriors gràfiques s'aprecien clarament les dues etapes de l'algoritme. La primera, encarregada de buscar on se situa el màxim absolut de potència, es mostra poc temps després de passar al següent escenari, ja que en aquest règim el conjunt d'irradiàncies tenen valors molt distants entre els diferents escenaris. La segona etapa, empleada per situar i rastrear el GMPP, és fa notar al presentar fluctuacions al utilitzar el mètode de pertorbació i observació.

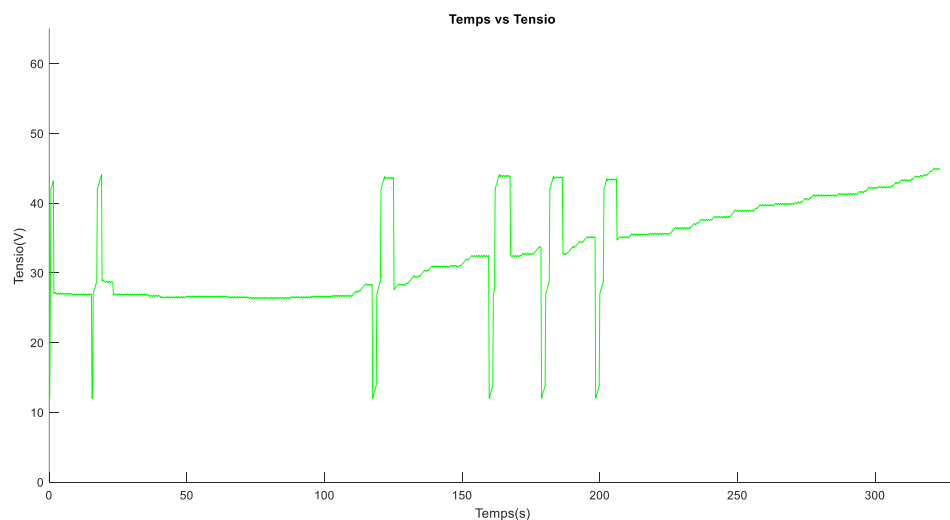
Pel que fa la resposta de l'algoritme, aquest presenta una gran estabilitat davant el GMPP i també aconseguix tenir una velocitat molt elevada en trobar aquest punt gràcies a focalitzar la cerca del GMPPT en marges prèviament definits.

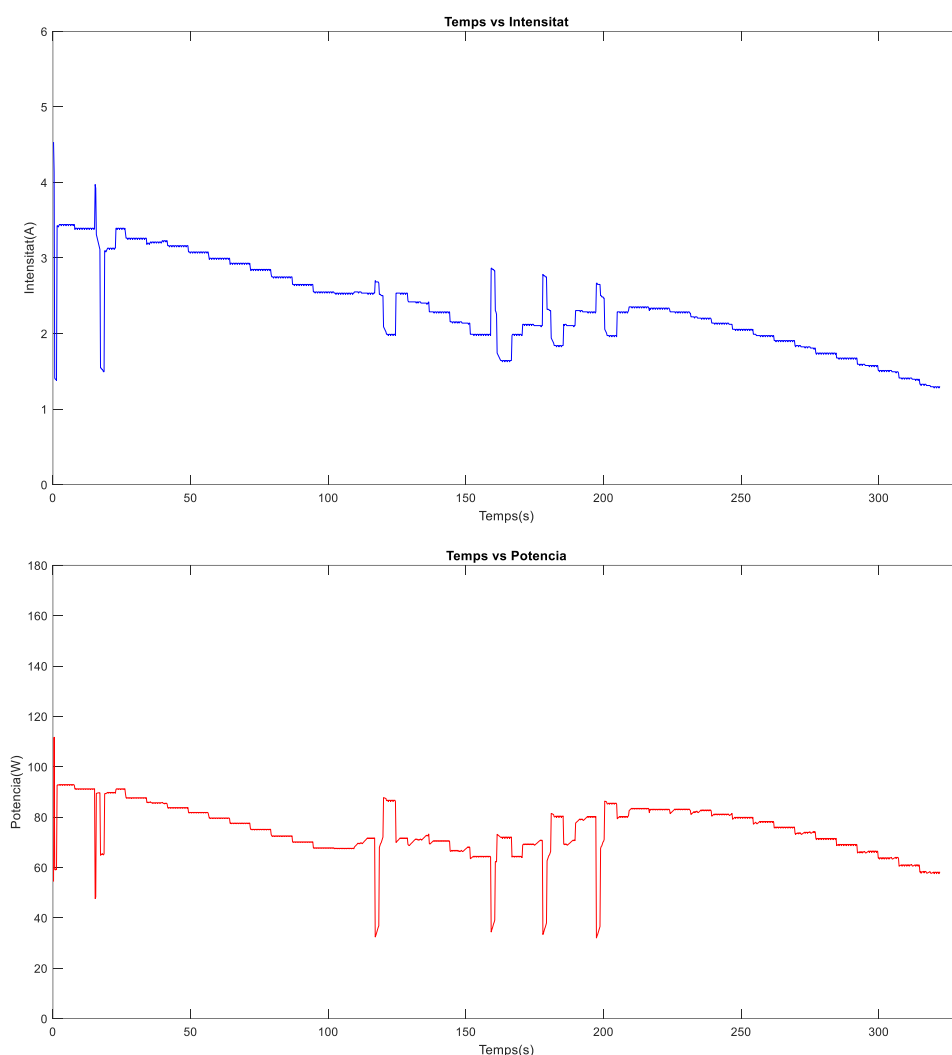
Per contra pot quedar-se estancat en punts morts sense arribar al màxim, tal com passa al segon escenari i en una petita part del tercer. Però, el fet que passes en aquests dos és deu a que la càrrega electrònica no recrea perfectament les corbes i ha donat en aquests un petit pic on s'ha estancat l'algoritme, el qual no és veu si no s'amplia molt la corba del escenari.

De totes formes l'algoritme de $0.8 V_{OC}$ continua sent molt recomanable ja que fent ús de l'equació 5.1 ens dona un **rendiment del 94,4%**, fent que no sigui solament ràpid i fàcil d'aplicar, sinó també molt eficient.

5.1.2. Resposta davant dels escenaris dinàmics.

Les següents il·lustracions mostren la resposta de l'algoritme davant de canvis lleugers però constants.





Il·lustració 5.3. Gràfica Tensió, Intensitat i Potència respecte el temps del algoritme $0.8 V_{OC}$ en règim dinàmic.

L'anterior gràfica de potència entre el temps es veu força semblant tant en valors com en forma a la il·lustració 4.7. A més, les potències aconseguides per l'algoritme s'apropen a les màximes que podria donar la instal·lació fotovoltaica.

Les il·lustracions mostren com en molts escenaris el mateix algoritme P&O rastreja el GMPP sense necessitar fer la etapa de cerca. Això, es deu al condicionar el funcionament d'aquesta etapa a un increment de potència de referència. En aquest algoritme a base d'experimentar s'ha acceptat que el 5% era el que generava millors resultats.

El fet que no sempre s'utilitzi l'etapa 1 per cercar el màxim pot ocasionar que durant un interval de temps no es treballi al punt global de màxima potència, però per contra disminuir els processos de cerca fa que s'ocasionin menys pèrdues.

Aplicant l'equació 5.1 dona un **rendiment del 90,7%**. Com aquest règim és més complex que l'estàtic, una eficiència d'aquest valor és més que acceptable. De fet, mirant la seva fàcil aplicació i el rendiment que dona tant en règims estàtics com dinàmics fa que sigui un molt bon algoritme a tenir en compte.

5.2. Algoritme Differential Evolution (DE)

L'altre algoritme que es programa és el de "*Differential Evolution*" que parteix del mètode de "*soft Computing*". Les principals avantatges d'utilitzar-lo són la seva ràpida convergència i la robustesa per trobar gairebé sempre el màxim global. L'article de la referència^[8] és el que s'ha basat per definir l'algoritme utilitzat, el qual és una adaptació del proposat per Storn i Price al 1996.

El "*Differential Evolution*" consta d'un procés iteratiu on una determinada població va convergint fins arribar a un valor òptim. El nombre de població serà durant tot el procés constant i es força recomanable que no sigui molt gran perquè augmentaria el temps de convergència.

L'algoritme parteix d'una població que s'organitzen en un vector objectiu on cada valor d'aquest marca el voltatge del conjunt de panells. Si l'algoritme es situa a la primera iteració o el sistema de seguiment considera que s'ha de tornar a buscar el GMPP, el vector objectiu vindrà donat per uns valors prèviament definits en els quals se'ls mesurarà la intensitat per així conèixer la potència que generen. En cas contrari, els valors de cada individu de la població seran els que s'arrastren de l'anterior iteració.

Un cop definit el vector objectiu s'ha de generar un vector mutant, aquest s'aconsegueix mitjançant l'ús de números aleatoris que van des de els 0 volts fins la tensió de circuit obert del conjunt de panells connectats en sèrie. El vector mutant és de la mateixa mida que el objectiu i cada individu que el forma s'obtindrà segons l'equació 5.4.

$$X_{i,mutant} = X_{random,1} + F \cdot (X_{random,2} - X_{random,3}) \quad (5.4)$$

On:

- X= Valor del individu.
- i = Posició del individu dins el vector mutant.
- F = Factor dins el rang de 0 a 1.

El següent pas consisteix en barrejar el vector mutant amb el vector objectiu on de forma aleatòria s'escull per cada posició quin valor dels dos formarà part del vector "*crossover*" o d'encreuament. Aquest també tindrà el mateix nombre de població que els dos anteriors.

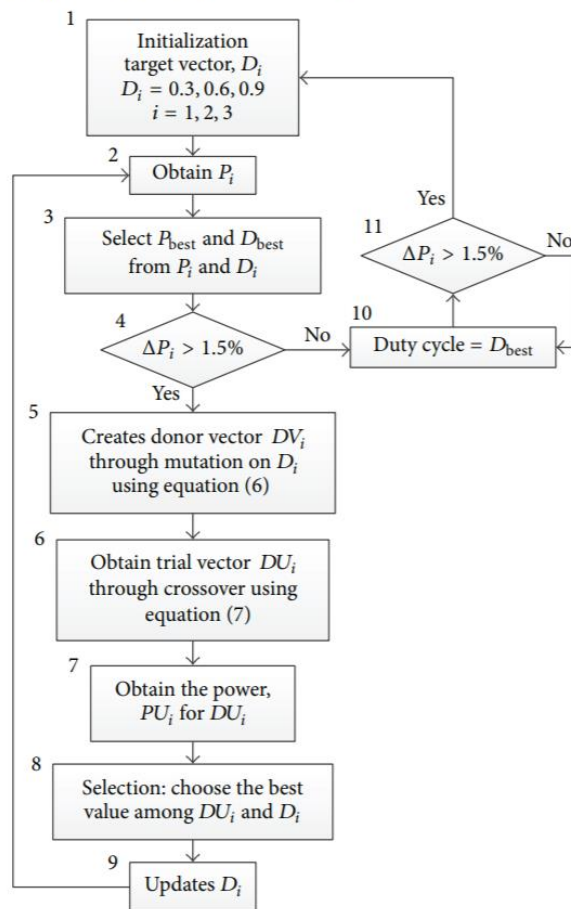
El procediment marcat per seleccionar el valor de cada individu del vector “*crossover*” és generant un número aleatori comprés entre el 0 i l’1. Si el número resultant supera a un rati prèviament definit, el CR, el valor que ocuparà la posició del nou vector serà provinent del vector mutant en comptes del vector objectiu.

Tot seguit es mesuraran les potències que corresponen als valors del vector “*crossover*” i es compararan amb les pròpies del vector objectiu, escollint per cada posició el valor que generi més potència. Com en alguns punts a comparar coincideixen els valors de ambos vectors no farà falta mesurar la potència pel fet de ser coneguda. El vector que es generarà serà el nou vector objectiu de la següent iteració.

Finalment, el procediment es repeteix fins que l’increment de potència de cada posició del vector objectiu respecte la potència més gran d’aquest no superi un percentatge donat. Quan això passa, l’algorisme farà un seguiment del valor que genera la màxima potència i el mantindrà fins que entre dues mesures successives detecti que ha sorgit un increment de potencia superior al que s’ha definit. Quan passa això, l’algorisme haurà d’iniciar altre cop des del principi amb els valors inicials del vector objectiu.

El diagrama de flux d’aquest algorisme es pot observar en la il·lustració 5.4.

Application of DE in MPPT controller



Il·lustració 5.4. Diagrama de flux del algoritme DE [7].

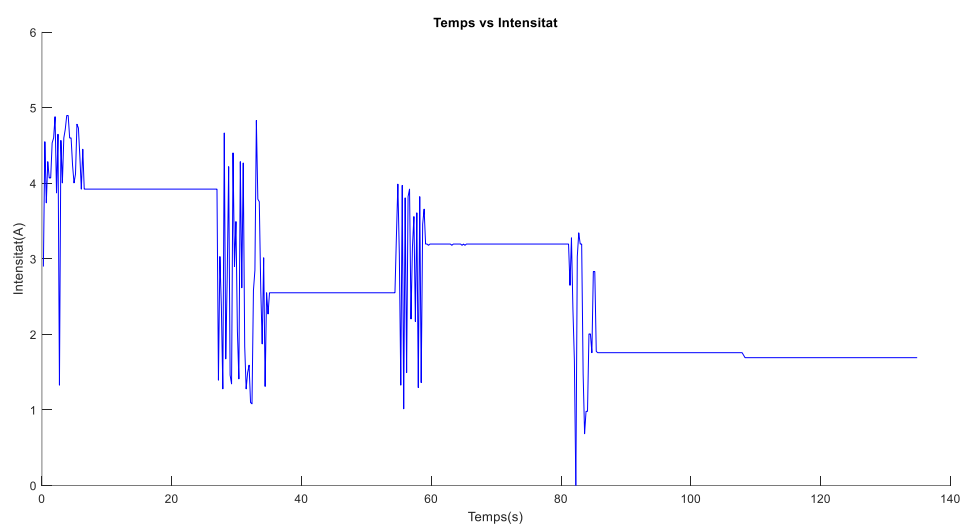
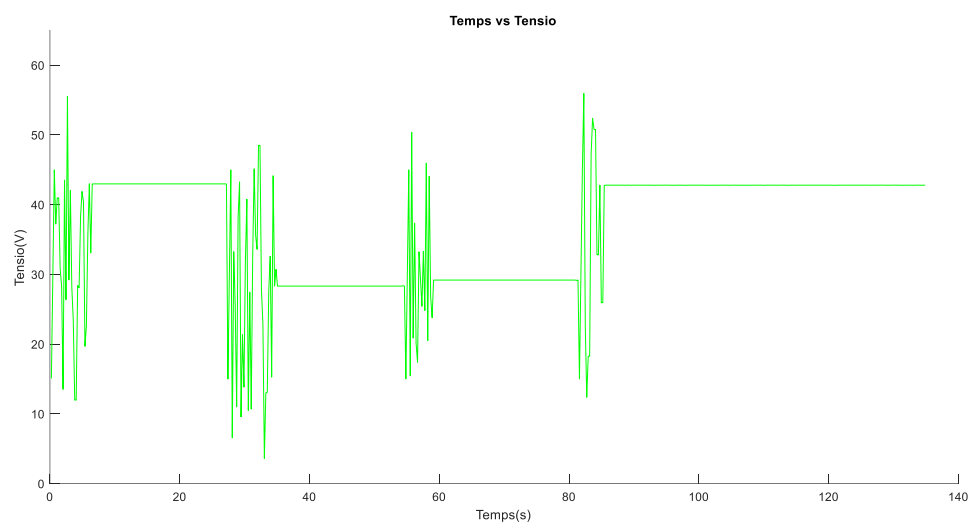
En l'algoritme s'han dut a terme certes modificacions per fer-lo més eficient i segur. Pel que respecta a l'eficiència, s'ha donat un valor de referència a l'increment de potència a base d'experimentar quin aconseguia millors resultats tant en el règim dinàmic com en el estàtic. Referent a la seguretat s'han posat certes condicions en el algoritme per reduir qualsevol valor del vector mutant superior a 60 V, ja que la càrrega electrònica no ho podria suportar i en conseqüència es paraltzaria la simulació.

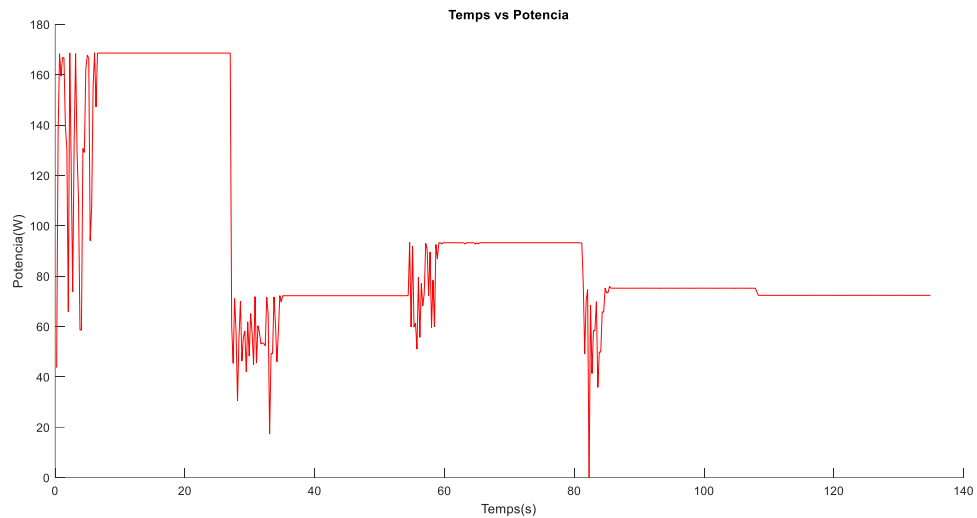
L'algoritme DE, a l'utilitzar números aleatoris per trobar el GMPPT, fa que per cada simulació en les mateixes condicions doni una resposta diferent. Per tal, alhora d'escollir una eficiència s'han realitzat 5 simulacions per cada un dels règims i s'ha suposat que la correcta era la que estava més al mig. Cal deixar clar que encara que en totes sigui diferent el rendiment, entre ells únicament tenen una desviació màxima d'un 1,5%.

El codi utilitzat per programar aquest algoritme es troba a l'ANNEX A3.

5.2.1. Resposta davant dels escenaris estacionaris

En les següents gràfiques es pot veure el comportament de l'algorisme envers el règim estàtic prèviament definit a l'apartat 4.1.





Il·lustració 5.5. Gràfica Tensió, Intensitat i Potència respecte el temps del algorisme DE en règim estàtic.

Mirant les gràfiques anteriors es veuen les dues fases de l'algorisme. La primera és de cerca, on es modifica el voltatge de la carga electrònica fins trobar el punt de màxima potència i la segona de seguiment, en la qual es manté en el GMPP trobat fins que detecta un canvi de potència prou significatiu.

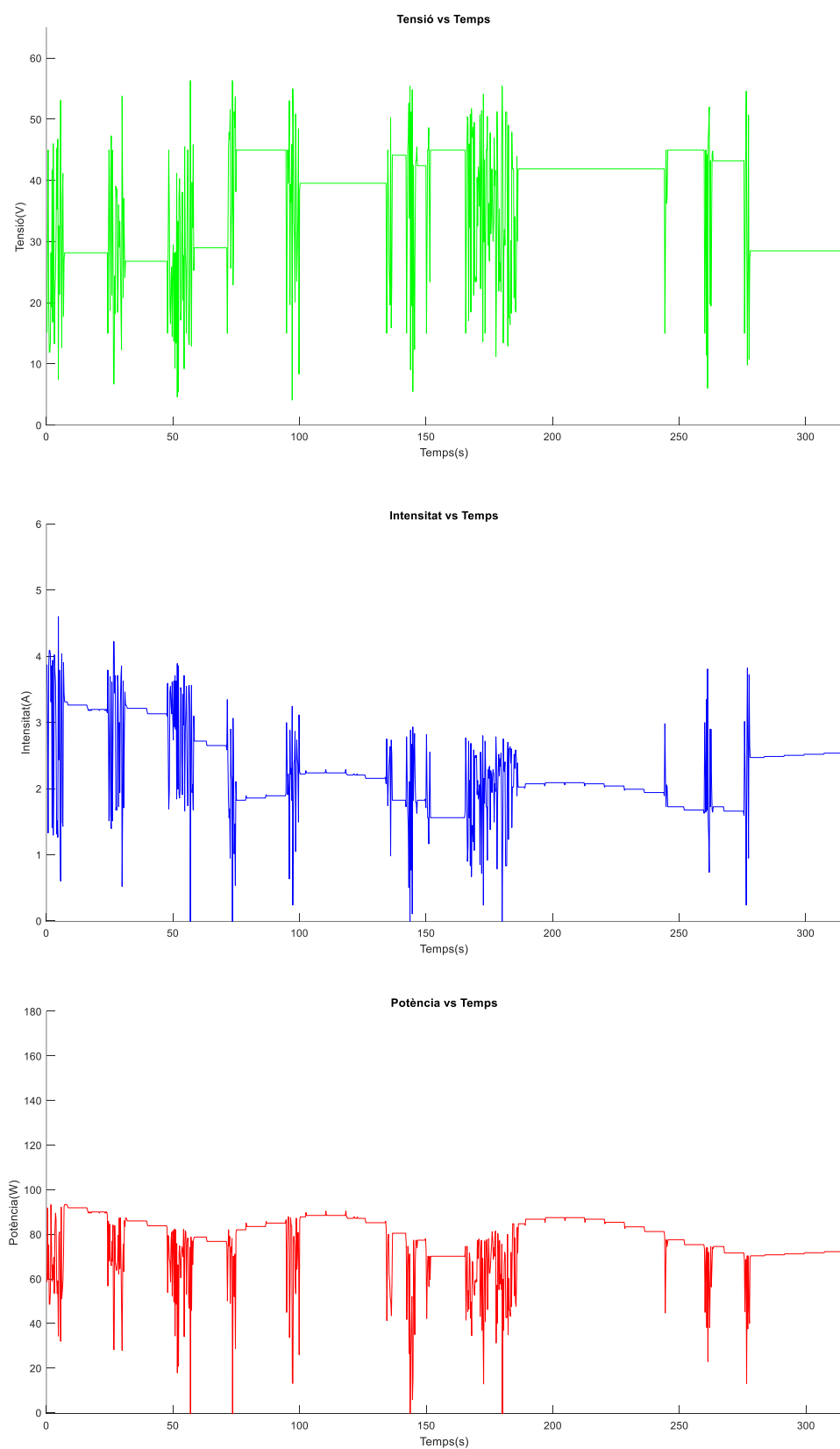
Com la primera fase utilitza valors aleatoris per buscar el GMPP ocasionarà unes grans oscil·lacions, les quals són més presents al seu començament. Per contra, el procés de convergència és molt ràpid i en poca estona troba el GMPP.

La segona etapa manté el voltatge fix quan s'ha trobat el GMPP, evitant que es formin fluctuacions al voltant d'ell a diferencia del algorisme de $0.8 V_{OC}$.

Com el “*Differential Evolution*” té una gran velocitat de convergència i no presenta oscil·lacions ocasiona que el **rendiment** del sistema sigui molt elevat. Aplicant l'equació 5.1 ens donarà un percentatge del **95,7%**, encara que tal com s'ha explicat prèviament pot variar lleugerament en altres simulacions. A més el DE és molt robust ja que s'ha situat en tot moment al punt global de màxima potència.

5.2.2. Resposta davant dels escenaris dinàmics

Les següents il·lustracions mostren la resposta de l'algorisme davant de canvis lleugers però constants.



Il·lustració 5.6. Gràfica Tensió, Intensitat i Potència respecte el temps del algoritme $0.8 V_{OC}$ en règim dinàmic.

Les anteriors gràfiques mostren el voltatge, la intensitat i la potència respecte el temps. L'última d'elles es gairebé calcada a la il·lustració 5.7, on els valors de cada punt de la gràfica concorden pràcticament amb els valors GMMP mesurats dels diferents escenaris dinàmics.

L'etapa de cerca ha estat força present durant la simulació, essent més freqüent que en l'altre algoritme, encara que al constar amb una convergència ràpida ha fet que no generi grans pèrdues.

Aplicant en l'equació 5.1 en aquest cas dona un **rendiment del 93,6%**, el qual és molt elevat tenint en compte que el règim en que s'ha provat era més complex que l'estàtic. Aquesta eficiència és deu principalment a la gran robustesa del algoritme alhora de situar els panells en el seu màxim global i a la ja nombrada ràpida convergència del algoritme.

5.3. Comparació entre els algorismes

En aquest subapartat s'ha considerat necessari fer una breu comparació entre els algorismes, per tal de deixar clar en quines parts destaca cada un d'ells.

La següent taula mostra el rendiment dels algorismes en els diferents règims a mode de resum, ja que aquest paràmetre permet una comparació purament objectiva del funcionament de cada un d'ells.

Règim \ Algoritme	0.8 V _{OC}	Differential Evolution
Estàtic	94,4%	95,7%
Dinàmic	90,7%	93,6%

Taula 5.1. Comparativa de les eficiències de cada algoritme.

Pel que respecta al règim estàtic els algorismes aconseguixen rendiments propers al 95%, sent lleugerament el valor en el DE. Aquests alts rendiments impliquen que tenen una resposta ràpida i fiable davant de grans canvis en les condicions que afecten al panell.

Les eficiències en el règim dinàmic continuen sent altes per als dos algorismes, però el DE aconseguix encara una eficiència propera al 95% mentre que la del 0.8 V_{OC} se situa vora el 90%. De la diferència de rendiments es dedueix que el "Differential Evolution" té un seguiment més precís davant de canvis lleugers i constants.

En resum, les eficiències d'ambos algorismes són molt elevades en cada un dels règims. Això els converteix als dos en algorismes més que interessants, encara que el *Differential Evolution* té una millor resposta especialment en els escenaris dinàmics. S'ha de tenir en compte que els rendiments dels dos algorismes serien lleugerament superiors en un cas real al haver fet les simulacions en escenaris desfavorables.

També s'ha de tenir en compte que malgrat l'alt rendiment del DE, aquest presenta soroll alhora de cercar el GMPP. Aquest soroll pot generar harmònics i en conseqüència malmetre els equips connectats. Per tant, l'elecció de quin dels dos algorismes és més òptim ja no serà tan clar i dependrà de les condicions de la mateixa instal·lació.

6. Anàlisi de l'impacte ambiental

El desenvolupament de l'aplicació no ha comportat cap impacte negatiu respecte la utilització de materials. Això és degut a que el software és pròpiament intangible i els instruments que s'han fet servir per comprovar el funcionament de l'aplicació ja formaven part del laboratori.

Durant el funcionament normal de l'aplicació es genera un impacte ambiental positiu al permetre aprofitar més potència dels panells fotovoltaics. Aquest fet fa que és pugui generar més energia sostenible en una mateixa instal·lació, implicant en conseqüència que la producció renovable augmenti.

Davant d'accidents l'aplicació té mesures de seguretat per no crear sobretensions en els panells per tal de protegir els components que formen part de la instal·lació. Respecte l'averia d'aquest, l'efecte que causaria seria que no situaria la instal·lació fotovoltaica al punt global de màxima potència, però continuaria produint.

En resum, es pot afirmar que el programa desenvolupat té un impacte ambiental positiu al potenciar l'eficiència dels panells, no requerir de materials, aprofitar instruments i no generar cap situació de risc o perillosa davant d'accidents i/o averies.

Conclusions

Un cop realitzades les simulacions que engloben a aquest projecte, puc dir que s'ha pogut desenvolupar una aplicació en Matlab capaç de fer un correcte rastreig del punt global de màxima potència per dos algorismes diferents.

Pel que respecta a l'apartat de la programació s'ha pogut modelitzar de forma precisa el panell fotovoltaic que és capaç de funcionar a un ampli ventall de voltatges de circuit obert, intensitats de curtcircuit, irradiàncies i temperatures.

Destacar que les connexions i mesures de seguretat respecte als instruments han estat correctament implantades, inclús assegurant que en tot moment cap dels instruments utilitzats s'espalli a causa del procés de cerca i rastreig del GMPP.

Encara que no s'hagin plantejat escenaris on la temperatura canviï, el programa continuaria funcionant correctament. Això es deu al fet que la temperatura únicament té un efecte significatiu en les tensions de les corbes que generen els penells, les quals no afectarien el funcionament dels algorismes si les temperatures no fossin molt extremes.

Els algorismes DE encara que s'hagin posicionat com els més eficients presenten un soroll considerable alhora d'efectuar la cerca del GMPPT. Aquest soroll pot malmetre el funcionament dels aparells i generar certs harmònics no desitjats.

Pel que respecte a l'eficiència dels algorismes s'han superat les expectatives, obtenint-se valors superiors al 90% en tots els règims gràcies a la ràpida convergència i a la bona adaptació en els diferents escenaris plantejats. Val a dir que tant els algorismes plantejats com la resta de GMPPT no són presents al mercat, a causa de ser relativament recents i que les empreses són reticents alhora de traure un nou producte al mercat.

Finalment, una possible continuació del projecte seria la comparació entre els algorismes de GMPPT i els de MPPT per uns mateixos escenaris amb presència d'ombres parcials. D'aquesta forma es podrien obtenir conclusions més significatives sobre si els algorismes que busquen el global són realment útils.

Pressupost i Anàlisi Econòmica

El pressupost s'ha desglossat en dos conjunts. El primer engloba els costos dels equips utilitzats, mentre que l'altre els costos relatius a l'enginyeria i software.

Pel que respecta als costos dels equips s'ha suposat que tenen una amortització de deu anys, 5 per al ordinador, i que només s'han utilitzat un 50% del temps durant 6 mesos.

Quantitat	Amortització	Descripció	Preu Unitari (€)	Preu Total (€)
1	$\frac{6 \text{ mesos}}{10 \text{ anys}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{12 \text{ mesos}} \cdot 0,5 = 0,025$	Agilent E4350B	3373,90	84,34
1	$\frac{6 \text{ mesos}}{10 \text{ anys}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{12 \text{ mesos}} \cdot 0,5 = 0,025$	Agilent E4360A	5400,95	135,02
1	$\frac{6 \text{ mesos}}{10 \text{ anys}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{12 \text{ mesos}} \cdot 0,5 = 0,025$	HP 6060B	900,01	22,5
1	$\frac{6 \text{ mesos}}{10 \text{ anys}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{12 \text{ mesos}} \cdot 0,5 = 0,025$	Agilent 82357A	95,43	2,39
3	$\frac{6 \text{ mesos}}{10 \text{ anys}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{12 \text{ mesos}} \cdot 0,5 = 0,025$	National Instrument connector GPIB	30,00	2,25
1	$\frac{6 \text{ mesos}}{5 \text{ anys}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{12 \text{ mesos}} \cdot 0,5 = 0,05$	HP Envy 13	800,00	40
			Preu Total (€)	286,5

Tabla 1. Costos dels equips utilitzats

Pel que fa a les hores d'enginyeria aquestes suposarien unes 200 a un preu de 25€/ hora bruts. S'han comptabilitzat menys hores de les reals al no poder sumar el temps dedicat a la documentació, connexió dels aparells i aprendre a programar en Matlab.

Quantitat	Descripció	Preu Unitari (€)	Preu Total (€)
1	Llicència Matlab	69	69
160 hores	Programació de l'aplicació	25	4000
40 hores	Connexió dels instruments i simulació dels algoritmes	25	1000
50 hores	Redacció de la memòria	25	1250
		Preu Total (€)	6319

Tabla 2. Costos d'enginyeria i software

Fent la suma entre els dos preus totals ens dona un cost de 6605,5 €. A l'anterior, s'afegeix un increment d'un 10% per tal de reflectir costos indirectes que són difícils de quantificar com el cost referent a l'electricitat o a l'aigua entre d'altres. Per tant el pressupost total és de **7266,05€**.

Els equips que s'han plantejat en aquest pressupost són de segona mà, per tal de reduir el cost total. L'altre apartat que suposa un gran desembossament de diners és el cost de les hores d'enginyeria, el qual encara que sigui elevat és més que raonable.

Bibliografia

1. Velasco, G. Tema 2, Components discrets. Sistemes Electrònics. A: *Universitat politècnica de Catalunya, Departament d'enginyeria electrònica*.
2. Bonkougou, D., Koalaga, Z. i Njomo, D. Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB. A: *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2013, Vol. 3, núm. 3, p. 493-502. ISSN 2079-9292. DOI 10.3390/electronics2030192.
3. Gamba, J.C., Romero, A. i Hernandez, J. Development of a photovoltaic panel model to find the solar cells optimal reconfiguration under partial shading condition. A: *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015*. IEEE, 2015, núm. 1, p. 1-6. DOI 10.1109/PVSC.2015.7355827.
4. Fatemi, S.M., Shadlu, M.S. i Talebkhah, A. Comparison of Three-Point PO and Hill Climbing Methods for Maximum Power Point Tracking in PV Systems. A: *2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC 2019*. IEEE, 2019, p. 764-768. DOI 10.1109/PEDSTC.2019.8697273.
5. Ahmed, J. i Salam, Z. An improved method to predict the position of maximum power point during partial shading for PV arrays. A: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. IEEE, 2015, Vol. 11, núm. 6, p. 1378-1387. ISSN 15513203. DOI 10.1109/TII.2015.2489579.
6. Li, X. et al. Modified Beta Algorithm for GMPPT and Partial Shading Detection in Photovoltaic Systems. A: *IEEE Transactions on Power Electronics*. IEEE, 2018, Vol. 33, núm. 3, p. 2172-2186. ISSN 08858993. DOI 10.1109/TPEL.2017.2697459.
7. Al-Ramaden, A. i Smadi, I.A. Partial shading detection and global MPPT algorithm for PV system. A: *2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology, JEEIT 2019 - Proceedings*. IEEE, 2019, p. 135-140. DOI 10.1109/JEEIT.2019.8717442.
8. Tey, K.S. et al. A Differential Evolution Based MPPT Method for Photovoltaic Modules under Partial Shading Conditions. A: . Hindawi Publishing Corporation, 2014, Vol. 2014.

Annex A. Codis emprats en l'aplicació de Matlab

A1. Funció del model matemàtic del panell fotovoltaic

```
function [as] = NoumodelPV(G,Tcell,Figura)
%%Si posesim uns altres valors el instrument E3460A NO FUNCIONARIE
Vocr=20;%Voltatge en circuit obert de referencia
Iscr=5;%Corrent en circuit obert de referencia
Vmppr=14;%Voltatge de maxima potencia al punt de referencia
Imppr=4;%Corrent de maima potencia al punt de referencia
Go=1000; %Irradiancia de referencia
V=[0:0.1:20];
T=298.15;
Ki=390*10^(-6);%es el coeficient de temperatura respecte la intensitat de
curtcircuit
Kv=2.90e-3;
qeiec=1.6e-19;
kbolzman=1.38*10e-23;
Vtr=kbolzman*T/qeiec;
Eg=1.7944377528e-19;
I=zeros(1,length(V));
Rsr=1;%Calculats analiticament
Rshr=60.047;
A=(Vmppr+Imppr*Rsr-Vocr)/((Vtr)*(log(Iscr-(Vmppr/Rshr)-Imppr)-log(Iscr-
Vocr/Rshr)+Imppr/(Iscr-Vocr/Rshr)));
Iorr=(Iscr-Vocr/Rshr)*exp(-Vocr/(A*Vtr));
Rsh=Rshr;
Rs=Rsr-(A*Vtr/Iorr)*exp(-Vocr/(A*Vtr));
Ipvrr=Iscr*(1+Rs/Rsh)+Iorr*(exp(Iscr*Rs/A/Vtr)-1);
a=1;
while a<=length(G)
    if G(a)<50
        cg(a,:)= [0,0,0,0,0];
        L(a,:)=zeros(1,length(V));
    else
        Vt=Vtr*(T/Tcell);
        Io=Iorr*((T/Tcell)^3)*exp(Eg/(kbolzman*T)-Eg/(kbolzman*Tcell));
        Ipv=(G(a)/Go)*(Ipvrr+Ki*(Tcell-T));
        Voc=25; %li donem un valor gran
        Pmax=0.1;%li donem un valor petit
        In=0.1;
        for i=1:length(V)
            for e=1:30
                Inr=In-(In-Ipv+Io*exp((V(i)+In*Rs)/(A*Vt))+(V(i)+In*Rs)/Rsh-
                Io)/(1+(Io*Rs)/(A*Vt)*exp((V(i)+In*Rs)/(A*Vt))+Rs/Rsh);
                In=Inr;
                e=e+1;
            end
        end
    end
    a=a+1;
end
```

```

        if In>0.1
            I(i)=In;
        else
            In=0;
            I(i)=In;
            if Voc>V(i)
                Voc=V(i);
            end
        end
        if Pmax<I(i)*V(i);
            Pmax=I(i)*V(i)
            Imax=I(i);
            Vmax=V(i);
        else
            Pmax=Pmax;
        end

        end
        i=i+1;
    end
    cg(a,:)=[Voc,Vmax,Ipv,Imax,Pmax];
    L(a,:)=I;
end
a=a+1;
end
I;
Temp=num2str(Tcell,'%4.2f');
K=' K';
Temperatura=strcat(Temp,K);
figure(Figura)
hold on
plot(V,L)
title('Corba I-V')
ylabel('Intensitat(A)')
xlabel('tensió(V)')
axis([0 23 0 6])
legend(Temperatura)
hold off
figure(Figura+3)
hold on
plot(V,V.*L)
title('Corba P-V')
ylabel('Potència(W)')
xlabel('tensió(V)')
legend(Temperatura)
hold off
as=cg
end

```

A2. Algoritme 0.8 V_{oc}

```

clc
clear all
load PV11
load PV12
load PV13
ISC1=PV11(:,3);
IMAX1=PV11(:,4);
VOC1=PV11(:,1);
VMAX1=PV11(:,2);
ISC2=PV12(:,3);
IMAX2=PV12(:,4);
VOC2=PV12(:,1);
VMAX2=PV12(:,2);
ISC3=PV13(:,3);
IMAX3=PV13(:,4);
VOC3=PV13(:,1);
VMAX3=PV13(:,2);
Vcell=zeros(1,35);% es podra baixar pero no molt
Icell=zeros(1,length(Vcell));
Pcell=zeros(1,length(Vcell));
Vout=zeros(length(VOC1),length(Vcell));
Iout=zeros(length(VOC1),length(Vcell));
Pout=zeros(length(VOC1),length(Vcell));
Voc=20;
g1=gpib('agilent',7,7);%obrim la carga electronica
g2=gpib('agilent',7,6);%obrim el sas (Canal 1 i 2)
g3=gpib('agilent',7,4);%obrim el sas
fopen(g1);
fprintf(g1,'INPUT OFF');
fopen(g2);
fprintf(g2,'OUTP OFF,(@1,2)');
fopen(g3);
fprintf(g3,'OUTP OFF');
%%%%
fprintf(g2,'CURR:MODE SAS,(@1,2)');
fprintf(g2,'VOLT:SLIM:HIGH 20,(@1,2)');% Sofy limit de 20 volts
fprintf(g3,'CURR:MODE SAS');
fprintf(g3,'VOLT:SLIM:HIGH 20');
fprintf(g2,'CURR:SAS:ISC 5,(@2);IMP 4.8,(@2);:VOLT:SAS:VOC 19,(@2);VMP 12,(@2)');
fprintf(g2,'OUTP ON,(@2)');
fprintf(g2,'CURR:SAS:ISC 5,(@1);IMP 4.8,(@1);:VOLT:SAS:VOC 19,(@1);VMP 12,(@1)');
fprintf(g2,'OUTP ON,(@1)');
fprintf(g3,'CURR:SAS:ISC 5;IMP 4.8;:VOLT:SAS:VOC 19;VMP 12');
fprintf(g3,'OUTP ON');
fprintf(g1,'MODE:VOLT');
fprintf(g1,'VOLT 1');
fprintf(g1,'INPUT ON');
%describim la llista que ha de seguir
APflag1=1;

```

```

MargeApflag1=0.045;

for irradiancia=1:length(VOC1)%Iterem per cada irradiancia
    fprintf(g2,'CURR:SAS:ISC %4.2f, (@2);IMP %4.2f, (@2);:VOLT:SAS:VOC
%4.2f, (@2);VMP
%4.2f, (@2)', [ISC1(irradiancia), IMAX1(irradiancia), VOC1(irradiancia), VMAX1(irradiancia)]);
    fprintf(g2,'CURR:SAS:ISC %4.2f, (@1);IMP %4.2f, (@1);:VOLT:SAS:VOC
%4.2f, (@1);VMP
%4.2f, (@1)', [ISC2(irradiancia), IMAX2(irradiancia), VOC2(irradiancia), VMAX2(irradiancia)]);
    fprintf(g3,'CURR:SAS:ISC %4.2f;IMP %4.2f;:VOLT:SAS:VOC %4.2f;VMP
%4.2f', [ISC3(irradiancia), IMAX3(irradiancia), VOC3(irradiancia), VMAX3(irradiancia)]);
%
%AQUÍ COMENÇA L'ALGORITME
%
    Vmax=0.70*Voc;
    Vmin=0.60*Voc;
    flag=1;
    kmax=3;%numero de panells en serie
    VLMPP=zeros(1,kmax);
    PLMPP=zeros(1,kmax);
    tempsalgor=0;
    npanell=1;
    t=0;
    IteracioMax=35;% 5 segons mes memys
    Numiteracio=0;
    while tempsalgor<20 && t==0%marquem aqui la rapidesa la t es traure despres
        if (flag==1) && (APflag1>MargeApflag1)%troba el global, el 5% es del
article
            z=1;
            for npanell=1:3
                Vramp(irradiancia,z)=Vmin+(20-5)*(npanell-1);%el mostreig inicial
                AI=0;
                fprintf(g1,'VOLT %4.2f',Vramp(irradiancia,z));
                pause(0.1)
                fprintf(g1,'MEAS:CURR?');
                Imeasured=fscanf(g1);
                Iramp0=str2double(Imeasured);
                tempsalgor=tempsalgor+0.1;
                excluirAPflag=1;
                while (AI<=0.012) && (Vramp(irradiancia,z)<=(Vmax+(20-5)*(npanell-1)))%Per mirar que no creixi masa el AI
                    fprintf(g1,'VOLT %4.2f',Vramp(irradiancia,z));
                    pause(0.1)
                    fprintf(g1,'MEAS:CURR?');
                    Imeasured=fscanf(g1);
                    Iramp(irradiancia,z)=str2double(Imeasured);

Pramp(irradiancia,z)=Iramp(irradiancia,z)*Vramp(irradiancia,z);

```

```
AI=abs((I_ramp(irradiancia,z)-I_ramp0)/I_ramp0);
I_ramp0=I_ramp(irradiancia,z);
VLMPP(npanel1)=V_ramp(irradiancia,z);
PLMPP(npanel1)=V_ramp(irradiancia,z)*I_ramp(irradiancia,z);
V_ramp(irradiancia,z+1)=V_ramp(irradiancia,z)+0.3;
tempsalgor=tempsalgor+0.1;
z=z+1;
Numiteracio=Numiteracio+1
end
end

[PGMPP,index]=max(PLMPP);
VGMPP=VLMPP(index);
flag=2;
%Vref=zeros(1,IteracioMax-Numiteracio);
Vref(1)=VGMPP;
Vpo=VGMPP;%es modificara despres al utilitzar el algorisme
else %troba el gmp
if (irradiancia)>1&&(APflag1<MargeApflag1)
V_ramp(irradiancia,:)=zeros;
I_ramp(irradiancia,:)=zeros;
P_ramp(irradiancia,:)=zeros;
end
fprintf(g1,'VOLT %4.2f',Vref(1));
pause(0.1)
tempsalgor=tempsalgor+0.1;
for e=1:(IteracioMax-Numiteracio)%aquí ve el algorisme
c=0.1;
if e==1
fprintf(g1,'MEAS:CURR?');
Intensitat=fscanf(g1);
Icell(e)=str2double(Intensitat);% el str2double es per passar
de character a integer
fprintf(g1,'MEAS:VOLT?');
Voltatge=fscanf(g1);
Vcell(e)=str2double(Voltatge);
Vref(e+1)=Vref(e)+c;
Pcell(e)=Vcell(e)*Icell(e);
fprintf(g1,'VOLT %4.2f',Vref(e+1));
else
AVref=Vref(e)-Vref(e-1);
pause(0.1)
fprintf(g1,'MEAS:CURR?');
Intensitat=fscanf(g1);
Icell(e)=str2double(Intensitat);% el str2double es per passar
de character a integer
fprintf(g1,'MEAS:VOLT?');
Voltatge=fscanf(g1);
Vcell(e)=str2double(Voltatge);
Pcell(e)=Vcell(e)*Icell(e);
AP=Pcell(e)-Pcell(e-1);
```

```

        tempsalgor=tempsalgor+0.1;
        if AP>=0
            if AVref<0
                Vref(e+1)=Vref(e)-c;
            else
                Vref(e+1)=Vref(e)+c;
            end
        else
            if AVref<0
                Vref(e+1)=Vref(e)+c;
            else
                Vref(e+1)=Vref(e)-c;
            end
        end
        fprintf(g1,'VOLT %4.2f',Vref(e+1));
    end
    Potencialast(irradiancia)=Pcell(end);
    if excluirAPflag==1
        APflag1=0;
    else
        APflag1=abs((Potencialast(irradiancia)-Potencialast(irradiancia-1))/Potencialast(irradiancia-1));
    end
    excluirAPflag=0;
    Vref(1)=Vref(end);
    t=1;
    Vout(irradiancia,:)=Vcell;
    Iout(irradiancia,:)=Icell;
    Pout(irradiancia,:)=Pcell;

end
end
end
for irradiancia=1:length(VOC1)
    Valgoraux(irradiancia,:)=Vramp(irradiancia,:) Vout(irradiancia,:);
    Ialgoraux(irradiancia,:)=Iramp(irradiancia,:) Iout(irradiancia,:);
    Palgoraux(irradiancia,:)=Pramp(irradiancia,:) Pout(irradiancia,:);
end
Valgor=nonzeros([Valgoraux(1,:)]);
Ialgor=nonzeros([Ialgoraux(1,:)]);
Palgor=nonzeros([Palgoraux(1,:)]);
for irradiancia=2:length(VOC1)
    Valgor=[Valgor nonzeros([Valgoraux(irradiancia,:)])];
    Ialgor=[Ialgor nonzeros([Ialgoraux(irradiancia,:)])];
    Palgor=[Palgor nonzeros([Palgoraux(irradiancia,:)])];
end
figure(11)
hold on
plot((1:1:length(Valgor))*0.216,Valgor,'g')
title('Temps vs Tensio')
xlabel('Temps(s)')

```

```
ylabel('Tensio(V)')
axis([0 330 0 65])
hold off
figure(12)
hold on
plot((1:1:length(Palgor))*0.216,Palgor,'r')
title('Temps vs Potencia')
ylabel('Potencia(W)')
xlabel('Temps(s)')
axis([0 330 0 180])
hold off
figure(13)
hold on
plot((1:1:length(Ialgor))*0.216,Ialgor,'b')
title('Temps vs Intensitat')
ylabel('Intensitat(A)')
xlabel('Temps(s)')
axis([0 330 0 6])
hold off
fclose(g1);
delete(g1);
clear g1
fclose(g2);
delete(g2);
clear g2
fclose(g3)
delete(g3)
clear g3
Potencia=sum(Palgor);
```

A3. Algoritme DE

```
%AQUÍ COMENÇA L'ALGORITME
F=0.8;%valors inicials
CR=0.67;%valor aleatori
Np=3;%numero de poblacio
APi=1;%diferencia de potencia
Iteracionstotals=35;
Calcularinici=0;
for irradiancia=1:length(VOC1)%Iterem per cada irradiancia
    fprintf(g2,'CURR:SAS:ISC %4.2f,(@2);IMP %4.2f,(@2);:VOLT:SAS:VOC
%4.2f,(@2);VMP
%4.2f,(@2)', [ISC1(irradiancia),IMAX1(irradiancia),VOC1(irradiancia),VMAX1(irradia
ncia)]);
    fprintf(g2,'CURR:SAS:ISC %4.2f,(@1);IMP %4.2f,(@1);:VOLT:SAS:VOC
%4.2f,(@1);VMP
%4.2f,(@1)', [ISC2(irradiancia),IMAX2(irradiancia),VOC2(irradiancia),VMAX2(irradia
ncia)]);
    fprintf(g3,'CURR:SAS:ISC %4.2f;IMP %4.2f;:VOLT:SAS:VOC %4.2f;VMP
%4.2f', [ISC3(irradiancia),IMAX3(irradiancia),VOC3(irradiancia),VMAX3(irradiancia)
]);
    Numiteracions=0;
    generation=1;
    if APi>0.045
        calcularinici=1;
        APi=0;
    end
    while generation<=(Iteracionstotals)
        if calcularinici==1
            Vinici(irradiancia,:)= [15 30 45];
            for NumeroPoblacio=1:Np
                fprintf(g1,'VOLT %4.2f',Vinici(irradiancia,NumeroPoblacio));
                pause(0.2)
                fprintf(g1,'MEAS:CURR?');
                Intensitat=fscanf(g1);
                Ifinal(irradiancia,generation)=str2double(Intensitat);
                Icell(irradiancia,NumeroPoblacio)=str2double(Intensitat);% el
str2double es per passar de character a integer
                fprintf(g1,'MEAS:VOLT?');
                Voltatge=fscanf(g1);
                Vfinal(irradiancia,generation)=str2double(Voltatge);
                Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio)=str2double(Voltatge);

                Pfinal(irradiancia,generation)=Vfinal(irradiancia,generation)*Ifinal(irradiancia,
generation);

                Pcell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio)*Icell(irradia
ncia,NumeroPoblacio);
                generation=generation+1;
            end
        end
    end
end
```



```

        calcularinici=0;
    else
        Vcell(irradiancia,:)=Vcell0;
        Icell(irradiancia,:)=Icell0;
        Pcell(irradiancia,:)=Pcell0;
    end
    [Pcellbest,index]=max(Pcell(irradiancia,:));
    Vcellbest=Vcell(irradiancia,index);
    AP=(Pcellbest-Pcell(irradiancia,:))/Pcellbest;
    if AP<0.045
        APi=0;
        z=2;
        Vfixa0=Vcellbest;
        Pfixa0=Pcellbest;
        Vinmutable=Vcellbest;%asseguro que no cambio
        recomptegeneration=generation;
        a=0
        while (generation<=Iteracionstotals)&&(APi<0.045)
            fprintf(g1,'VOLT %4.2f',Vinmutable);
            pause(0.1)
            fprintf(g1,'MEAS:CURR?');
            Intensitat=fscanf(g1);
            Ifixa=str2double(Intensitat);% el str2double es per passar de
character a integer
            fprintf(g1,'MEAS:VOLT?');
            Voltatge=fscanf(g1);
            Vfixa=str2double(Voltatge);
            Pfixa=Vfixa*Ifixa;
            APi=abs((Pfixa-Pfixa0)/Pfixa);
            Vfinal(irradiancia,generation)=Vfixa;
            Ifinal(irradiancia,generation)=Ifixa;
            Pfinal(irradiancia,generation)=Pfixa;
            generation=generation+1;
            z=z+1;
            a=a+1
        end

        if APi>0.045
            calcularinici=1;
            AP=1;
        end
    else%Parte de crear un vector mutante
        for NumeroPoblacio=1:Np
            vrandom = randi([0, 600],1,3)*0.1;%Per aplicar decimals
            if (vrandom(1)-0.8*abs((vrandom(2)-
vrandom(3))))||vrandom(1)+0.8*abs((vrandom(2)-vrandom(3))))>60
                Vmutation(NumeroPoblacio)=50;
            elseif vrandom(1)>=Vcellbest
                Vmutation(NumeroPoblacio)= vrandom(1)-0.8*abs((vrandom(2)-
vrandom(3)));
            else

```

```

        Vmutation(NumeroPoblacio)= vrandom(1)+0.8*abs((vrandom(2)-
vrandom(3)));
    end
    if rand>=CR%donde se crea el croseover
        Vcroseover(NumeroPoblacio)=Vmutation(NumeroPoblacio);
    else
        Vcroseover(NumeroPoblacio)=Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio);
    end
    if Vcroseover(NumeroPoblacio)==Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio)

Pcell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Pcell(irradiancia,NumeroPoblacio);

Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio);

Icell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Icell(irradiancia,NumeroPoblacio);
    else
        fprintf(g1,'VOLT %4.2f',Vcroseover(NumeroPoblacio));
        pause(0.2)
        fprintf(g1,'MEAS:CURR?');
        Intensitatseleccio=fscanf(g1);
        Iseleccio(NumeroPoblacio)=str2double(Intensitatseleccio);% el
str2double es per passar de character a integer
        Ifinal(irradiancia,generation)=Iseleccio(NumeroPoblacio);
        fprintf(g1,'MEAS:VOLT?');
        Voltatgeleccio=fscanf(g1);
        Vseleccio(NumeroPoblacio)=str2double(Voltatgeleccio);

Pseleccio(NumeroPoblacio)=Vseleccio(NumeroPoblacio)*Iseleccio(NumeroPoblacio);
        Vfinal(irradiancia,generation)=Vseleccio(NumeroPoblacio);
        Pfinal(irradiancia,generation)=Pseleccio(NumeroPoblacio);
        generation=generation+1;
    if
Pseleccio(NumeroPoblacio)>=Pcell(irradiancia,NumeroPoblacio)

Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Vseleccio(NumeroPoblacio);

Pcell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Pseleccio(NumeroPoblacio);

Icell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Iseleccio(NumeroPoblacio);
    else

Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Vcell(irradiancia,NumeroPoblacio);

Pcell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Pcell(irradiancia,NumeroPoblacio);

Icell(irradiancia,NumeroPoblacio)=Icell(irradiancia,NumeroPoblacio);
    end
end
end
Vcell0=Vcell(irradiancia,:);
Icell0=Icell(irradiancia,:);
Pcell0=Pcell(irradiancia,:);

```

```
        end
    end
end
    Valgor=[Vfinal(1,:)];
    Ialgor=[Ifinal(1,:)];
    Palgor=[Pfinal(1,:)];
    for irradiancia=2:length(VOC1)
        Valgor=[Valgor Vfinal(irradiancia,:)];
        Ialgor=[Ialgor Ifinal(irradiancia,:)];
        Palgor=[Palgor Pfinal(irradiancia,:)];
    end
    figure(11)
    hold on
    plot((1:1:length(Valgor))*0.2248,Valgor,'g')%Per que quedo fixat al temps que de
    veritat li correspon 140 segs de conometre
    title('Tensió vs Temps')
    xlabel('Temps(s)')
    ylabel('Tensió(V)')
    axis([0 330 0 65])
    hold off
    figure(12)
    hold on
    plot((1:1:length(Palgor))*0.2248,Palgor,'r')
    title('Potència vs Intensitat')
    ylabel('Potència(W)')
    xlabel('Temps(s)')
    axis([0 330 0 180])
    hold off
    figure(13)
    hold on
    plot((1:1:length(Ialgor))*0.23,Ialgor,'b')
    title('Intensitat vs Intensitat')
    ylabel('Intensitat(A)')
    xlabel('Temps(s)')
    axis([0 330 0 6])
    hold off
    fclose(g1);
    delete(g1);
    clear g1
    fclose(g2);
    delete(g2);
    clear g2
    fclose(g3)
    delete(g3)
    clear g3
    Potencia=sum(Palgor);
```